

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**  
**CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA, ATRIBUTOS DO SOLO E  
DA PLANTA NA DISCRIMINAÇÃO DE ÁREAS DE MANEJO  
ESPECÍFICO NA CULTURA DO CAFÉ**

**Gustavo Zanetti Pollo**  
**Engenheiro Agrônomo**

**2013**

D  
I  
S  
S.  
/  
P  
O  
L  
L  
O

G.  
Z.

2  
0  
1  
3

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP  
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA, ATRIBUTOS DO SOLO E  
DA PLANTA NA DISCRIMINAÇÃO DE ÁREAS DE MANEJO  
ESPECÍFICO NA CULTURA DO CAFÉ**

**Gustavo Zanetti Pollo**

**Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior**

**Dissertação apresentada à Faculdade de  
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,  
Campus de Jaboticabal, como parte das  
exigências para a obtenção do título de  
Mestre em Agronomia (Produção Vegetal).**

**2013**

Pollo, Gustavo Zanetti  
P776s      Suscetibilidade magnética, atributos do solo e da planta na  
discriminação de áreas de manejo específico na cultura do café /  
Gustavo Zanetti Pollo. – – Jaboticabal, 2013  
vi, 58 p. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2013  
Orientador: José Marques Júnior  
Banca examinadora: Leandro Borges Lemos, Célia Regina  
Lopes Zimback  
Bibliografia

1. *Coffea arabica*. 2. Zonas de manejo específico. 3. Agricultura  
de precisão. 4. Produtividade. 5. Tipo de café. I. Título. II.  
Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.473:528.7

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação  
– Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.





**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**

**CAMPUS DE JABOTICABAL**

**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS DE JABOTICABAL**

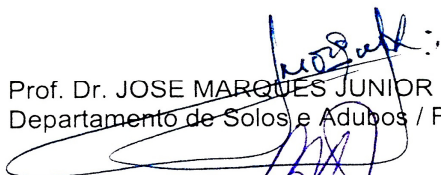
**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA, ATRIBUTOS DO SOLO E DA PLANTA  
NA DISCRIMINAÇÃO DE ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO NA CULTU-  
RA DO CAFÉ

**AUTOR:** GUSTAVO ZANETTI POLLO

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

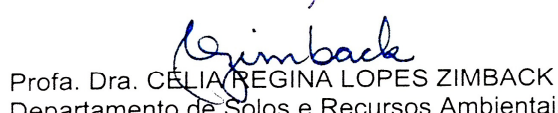
Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE EM AGRONOMIA  
(PRODUÇÃO VEGETAL) , pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

  
Prof. Dr. LEANDRO BORGES LEMOS

Departamento de Produção Vegetal / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

  
Profa. Dra. CELIA REGINA LOPES ZIMBACK

Departamento de Solos e Recursos Ambientais / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

Data da realização: 09 de agosto de 2013.

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

GUSTAVO ZANETTI POLLO – nascido em 16 de janeiro de 1986 em Ribeirão Preto – SP, graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – FCAV/UNESP Jaboticabal (2008). Atua na área de Agronomia, com ênfase em Agricultura de Precisão e Mapeamento de Solo, trabalhando principalmente nos seguintes temas: geoestatística, mapeamento de áreas de manejo específico com base na relação solo-relevo, técnicas pedométricas e classificação numérica. Membro ativo do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP Câmpus de Jaboticabal, coordenado pelo Prof. Dr. José Marques Júnior do Departamento de Solos e Adubos.

“Jeová, nosso Deus, é um só Jeová. E tens de amar a Jeová, teu Deus, de todo o teu coração, e de toda a tua alma, e de toda a tua força vital”

Deuteronômio 6:4



## **Dedico**

À Deus para que o nome Dele seja glorificado

## **Ofereço**

Ao meu pai Luiz, a minha mãe Regina, aos meus irmãos Augusto e Gregório  
e à minha noiva Andressa pelo apoio e carinho



## **AGRADECIMENTOS**

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho, Câmpus de Jaboticabal e ao curso de Produção Vegetal pela oportunidade e ensino.

Ao Grupo CSME – Caracterização do Solo para Fim de Manejo Específico que disponibilizaram toda estrutura necessária para o desenvolvimento desse trabalho.

A empresa Cambuhy Agrícola Ltda, por gentilmente ceder a área e grandes recursos para a execução do trabalho. E a todos os funcionários que participaram ativamente dessa empreitada.

Ao meu orientador José Marques Júnior, pela paciência, apoio, orientação e ensinamentos que por todo o mestrado ficou evidente. Através das nossas conversas e planos me ajudou a delinear meu futuro profissional e com maestria me abriu os olhos para um mundo novo de oportunidades que antes eu desconhecia.

Aos membros da banca examinadora Leandro Borges Lemos, pela amizade e grande orientação que sempre me deu, mais uma vez fez parte do meu caminho profissional não só como professor, mas como amigo também. À professora Célia Regina Lopes Zimback pelas correções e sugestões que muito contribuíram para a conclusão dessa dissertação.

A todos os amigos do CSME que me apoiaram, Daniel, Roni, Fred, Danilo, Lívia, Angélica, em especial Diego, Henrique e Yuri, que desde o início do trabalho ajudaram a desenvolvê-lo com grande esforço, gostaria de dizer que sem vocês não teria conseguido. Muito Obrigado.

Ao meu amigo Vírgilio, que sempre me apoiou nas adversidades da execução do trabalho e pelo companherismo e risadas de sempre. Será sempre considerado como um grande irmão. Muito Obrigado.

Ao meu paizão Miguel, que por muitas vezes deixou de realizar seus próprios afazeres para me ajudar e me orientar em todos os momentos.

Aos meus grandes amigos da Cambuhy, Diego e Renata que me ajudaram muito na execução do trabalho, e sempre estiveram ao meu lado



À minha família, em especial, Luiz (pai), Regina (mãe), Augusto e Gregório (irmãos), Cesar (avô), Zilá (avó – *in memoriam*), pelo amor enorme e apoio incondicional em todos os anos da minha vida, que agora se completa em mais uma etapa, vocês sempre foram presentes e são a base da minha vida. Amo vocês.

À minha noiva Andressa pelo amor e atenção dedicados nesses 9 anos de convivência, e hoje estamos completando mais uma etapa juntos. Somos um só, e compartilhamos as conquistas. Muito obrigado por fazer parte da minha vida.

À todos que porventura não foram mencionados, mas que contribuíram de uma forma ou de outra para a conclusão de mais uma etapa...



## SUMÁRIO

|                                                                                                                                        | Página |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....                                                                                                  | 1      |
| 1.1. INTRODUÇÃO .....                                                                                                                  | 1      |
| 1.2. REVISÃO DE LITERATURA .....                                                                                                       | 3      |
| 1.2.1. Áreas de manejo específico e variabilidade espacial.....                                                                        | 3      |
| 1.2.2. Suscetibilidade magnética e suas utilizações no estudo dos atributos do solo .....                                              | 4      |
| 1.2.3. Geoestatística aplicada em ciências agrárias .....                                                                              | 8      |
| 1.2.3.1. Variograma .....                                                                                                              | 10     |
| 1.2.3.2. Krigagem .....                                                                                                                | 11     |
| 1.3. REFERÊNCIAS.....                                                                                                                  | 12     |
| CAPÍTULO 2. ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO DA CULTURA DO CAFÉ POR SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E ESPESSURA DO SOLO.....                       | 20     |
| 2.1. INTRODUÇÃO .....                                                                                                                  | 21     |
| 2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                                           | 23     |
| 2.2.1. Caracterização da área e malha de amostragem.....                                                                               | 23     |
| 2.2.2. Análise dos atributos do solo.....                                                                                              | 24     |
| 2.2.3. Análise dos atributos da planta .....                                                                                           | 26     |
| 2.2.4. Análise estatística dos dados: análise descritiva e geoestatística.....                                                         | 27     |
| 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....                                                                                                        | 28     |
| 2.4 CONCLUSÕES .....                                                                                                                   | 38     |
| 2.5 REFERÊNCIAS.....                                                                                                                   | 38     |
| CAPÍTULO 3. ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO DA CULTURA DO CAFÉ POR SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA, ESPESSURA DO SOLO E ATRIBUTOS DA PLANTA ..... | 42     |
| 3.1. INTRODUÇÃO .....                                                                                                                  | 43     |
| 3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....                                                                                                           | 45     |
| 3.2.1. Caracterização da área e malha de amostragem.....                                                                               | 45     |
| 3.2.2. Análise do solo e planta .....                                                                                                  | 46     |
| 3.2.3. Análise estatística dos dados: análise descritiva e geoestatística.....                                                         | 47     |

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 47 |
| 3.4. CONCLUSÕES .....            | 54 |
| 3.5. REFERÊNCIAS.....            | 55 |

## **SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA, ATRIBUTOS DO SOLO E DA PLANTA NA DISCRIMINAÇÃO DE ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO NA CULTURA DO CAFÉ**

**RESUMO** – O mapeamento da distribuição espacial dos atributos físicos e químicos do solo, relacionados à produtividade agrícola, permite identificar zonas de manejo específico para as culturas, garantindo maior produtividade com menor custo de produção. Assim, o objetivo deste trabalho foi discriminar a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo relacionada à produtividade da cultura do café, identificando e mapeando zonas de manejo específico para a cultura, utilizando a suscetibilidade magnética (SM), espessura do solo e atributos da planta. O trabalho foi realizado no município de Matão, estado de São Paulo, na Fazenda Cambuhy Agrícola Ltda, onde o solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico. A área de estudo, de aproximadamente 39 hectares, foi escolhida mediante representatividade fisiográfica regional, onde nos últimos 25 anos foi ocupada exclusivamente por café, cuja espécie estudada foi *Coffea arabica*, cultivar Catuaí Amarelo IAC 62 com 7 anos de idade e espaçamento de plantio 3,5 x 0,50 m, fertirrigado por gotejamento. Para estabelecer os pontos de coleta, foi gerada uma malha amostral sob a área, com intervalos regulares de 45 m, perfazendo um total de 173 pontos. Em cada ponto, amostras de solo foram coletadas nas profundidades de 0,0 - 0,20 m e 0,60 – 0,80 m, para a avaliação dos atributos físicos, químicos, granulométricos e (SM). A unidade amostral de cada ponto foi composta por nove plantas, cuja produtividade, porcentagens de grãos retidos nas peneiras 14, 16 e 17, e tipo de café foram avaliados. Os atributos da planta, tais como teor de macro e micronutrientes da folha, altura da planta, diâmetro da copa e comprimento do ramo plagiotrópico também foram avaliados. A área de estudo foi representativamente amostrada para a avaliação da espessura do solo, o que permitiu a divisão da área em dois ambientes distintos. A análise estatística e geoestatística dos dados mostrou que a maior parte dos atributos estudados apresentou dependência espacial. A análise da SM, somada à avaliação da fertilidade do solo, condições nutricionais da planta e tipo de café produzido, foi eficiente na identificação de ambientes mais favoráveis à produção de café de

qualidade com baixo custo. Os dados da espessura do solo também possibilitaram identificar com eficácia as áreas com diferentes potenciais de manejo. Os maiores índices de produção foram observados nos locais com valor de SM elevado e menor espessura do solo. Isto sugere que a SM e espessura do solo podem ser utilizadas como atributos de diagnóstico na identificação de áreas com diferentes potenciais para produção da cultura do café.

**Palavras-chave:** *Coffea arabica*, zonas de manejo específico, agricultura de precisão, produtividade, tipo de café.

## **MAGNETIC SUSCEPTIBILITY, ATTRIBUTES OF SOIL AND PLANT IN DISCRIMINATION OF SPECIFIC MANAGEMENT AREAS IN COFFEE CULTURE**

**ABSTRACT** - Spatial distribution mapping of physical and chemical soil attributes, related to the agricultural productivity, allowed the identification of specific management zones for crops, ensuring greater productivity with lower production costs. The objective of this study was to evaluate the spatial variability of physical and chemical soil attributes related to coffee productivity, identifying and mapping specific culture management areas, using magnetic susceptibility (MS), soil thickness and plant attributes. The study was conducted in Matão, municipality of São Paulo state, at Fazenda Cambuhy Agrícola Ltda, where the soil is classified as dystrophic Ultisol. The area studied, of about 39 hectares, selected by physiographic regional representation, was occupied exclusively by coffee in the last 25 years. The variety studied was *Coffea arabica*, Catuai Yellow IAC 62 cultivar, 7 years old and planting spacing 3,5 x 0,50 m. To establish the point's samplings, it was generated a grid with regular intervals of 45 m, totalizing 173 points. In each point, soil samples were collected at 0,0 - 0,20 m and 0,60 - 0,80 m depth to evaluate the physical, chemical and granulometric attributes and magnetic susceptibility (MS). The sampling unit of each point was compounded by nine plants, whose productivity, percentage of grains in the sieves 14, 16 and 17, and coffee type, were evaluated. The plants attributes as content of macro and micronutrients in the leaf, plant height, canopy diameter and reproductive branches length were also evaluated. The area studied was representatively sampled for evaluation of the soil thickness, which allowed the division of the area in two different environments. The statistical and geostatistical analysis showed that most of the attributes studied presented spatial dependence. The analysis of MS, soil fertility, nutritional status of the plant and coffee type was efficient in identifying more favorable environments to the production of coffee with high quality at a low cost. Soil thickness data also allowed the effectively identification of areas with different potential management. The highest production rates were observed at the sites with the highest SM and lowest soil thickness. The

conclusion is that the SM and soil thickness can be used as diagnostic attributes to identify areas with different production potentials for the coffee crop.

**Keywords:** *Coffea arabica*, specific management zones, precision agriculture, productivity, type of coffee

## **CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS**

### **1.1. INTRODUÇÃO**

O café foi o principal responsável pelo desenvolvimento do Brasil a partir do início do século XVIII. A cultura propiciou a melhoria dos meios de transporte, abertura de rodovias mais modernas, construção de estradas de ferro e o surgimento de vilas e cidades, além de possuir grande importância na economia mundial devido à sua contribuição na receita cambial dos países produtores, formação de capital no setor agrícola e expressiva capacidade de absorção de mão-de-obra.

Em 2012, a produção de café no Brasil atingiu o montante de 50,8 milhões de sacas de 60 kg. O produto representou 6,7% de todas as exportações brasileiras do agronegócio, que chegaram a aproximadamente 28,7 milhões de sacas de 60 kg, com faturamento de US\$ 6,5 bilhões (ABIC, 2012).

Embora a cultura tenha grande expressão no cenário econômico brasileiro, os produtores enfrentam desafios como o alto custo de produção e falta de incentivos políticos. Segundo cotação da bolsa de valores de Nova York, o café apresentou queda de 25% do valor no período entre abril de 2012 a abril de 2013. Essa realidade obriga os produtores a adotarem novas tecnologias e tipos de manejo para reduzir os custos e aumentar a produtividade da cultura.

O estudo da variabilidade dos atributos do solo é essencial para fundamentar a incorporação de novas tecnologias que viabilizem a sustentabilidade de todo o processo produtivo (BARBIERI et al., 2007). Neste contexto, a agricultura de precisão apresenta-se como moderna ferramenta para traçar as melhores estratégias de manejo para a cultura do café. A agricultura de precisão tem como principal conceito a aplicação da exata necessidade de insumo no local correto e no momento adequado, para a máxima produção agrícola, em ambientes específicos cada vez menores e mais homogêneos, segundo tecnologia e recursos financeiros disponíveis (DOBERMANN; PING, 2004).

Para a identificação das áreas homogêneas na paisagem é necessário avaliar diversos fatores que influem na produção agrícola. Segundo Mulla; McBratney (1992;

2002), as mudanças dos atributos do solo encontram-se relacionadas às pequenas variações do relevo, que afetam o transporte e o armazenamento de água entre os perfis do solo. Outros pesquisadores (MARQUES Jr.; LEPSCH, 2000; SOUZA et al., 2004) sugeriram que as pequenas variações na topografia também precisam ser mapeadas para auxiliar na confecção de mapas detalhados dos atributos do solo que poderão ser relacionados àqueles gerados a partir dos atributos das plantas cultivadas.

A delimitação de zonas específicas de manejo do solo poderá ser feita com base na geoestatística (VIEIRA et al., 1983; McBRATNEY, 2003; SIQUEIRA; MARQUES Jr.; PEREIRA, 2010b). No entanto, a aplicação desta técnica requer um elevado número de pontos de observação (LEGROS, 2006), o que pode encarecer a atividade, fato este que tem levado pesquisadores a buscarem técnicas alternativas, como a aplicação de funções de pedotransferência na estimativa de atributos do solo a partir de outros atributos medidos com maior facilidade e baixo custo (McBRATNEY et al., 2002).

Dentro desse contexto, temos a suscetibilidade magnética (SM) que é um atributo de fácil medição que pode ser utilizado em funções de pedotransferência (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000). A utilização da SM nos estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo pode auxiliar tanto no planejamento agrícola como no manejo nutricional a partir da identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos, assim como foi observado por Cortez et al. (2011), que utilizaram a SM em um pomar de laranja para identificar os atributos do solo e da planta comparando-os ao relevo da área, demonstrando que a SM é eficaz na delimitação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualitativos.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi discriminar áreas de manejo específico para a cultura do café utilizando a SM e a relação solo-paisagem.

## **1.2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **1.2.1. Áreas de manejo específico e variabilidade espacial**

O conhecimento das causas da variabilidade do solo que influenciam a produção das culturas, e o mapeamento das suas propriedades, dependem do conhecimento dos processos que operam em locais específicos da paisagem (WILDING; DREES, 1983). A influência dos materiais de composição do solo, a história da evolução do relevo e os movimentos de água em subsuperfície, auxiliam na determinação dessas variações. Segundo Souza et al. (2001), a posição do terreno na paisagem, como declividade e forma do relevo, podem gerar rotas preferenciais para o fluxo de água, influenciando consideravelmente na variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo.

Além da variabilidade do solo causada pelos processos ambientais naturais, existem fontes adicionais que contribuem na modificação do solo. Silveira e Cunha (2002) relataram que tais variações são mais pronunciadas nos sistemas convencionais de preparo do solo do que nos conservacionistas e influenciam, principalmente, no acúmulo de material orgânico, na taxa de infiltração de água no solo e na erosão hídrica (BERTOL et al., 2004). O manejo das culturas, principalmente a aplicação de fertilizantes, também influencia na modificação ambiental e, conseqüentemente, na variabilidade do solo (BECKETT; WEBSTER, 1971).

A variação dos atributos da planta acompanha a distribuição espacial e variação de nutrientes no solo (MILLER et al., 1988). Isto ocorre porque a planta atua como integradora da variabilidade dos atributos do mesmo (SALVIANO et al., 1998). Assim, o estudo desses atributos em diferentes escalas permite explorar ao máximo a área para promover melhor produtividade da cultura e, conseqüentemente, maior lucratividade e/ou competitividade para a agroindústria (MAULE et al., 2001). Além disso, o conhecimento dos atributos do solo auxilia na tomada de decisões relativas à diminuição de custos, uso localizado e racional de insumos e recursos naturais, visando melhorar a produtividade das culturas e sua qualidade (LEÃO, 2004).

Alguns pesquisadores (GARRITY; AGUSTIN, 1995; MARQUES Jr., 2009) sugeriram que os estudos sobre manejo do solo devem ser baseados na análise espacial quantitativa dos seus atributos, o que permite identificar e mapear áreas de manejo específico que, por definição, apresenta mínima variabilidade dos atributos do solo, próximo à homogeneidade, permitindo a transferência de tecnologia para áreas semelhantes, e indicando a melhor técnica de manejo para este local específico (MALLARINO et al., 2001; SIQUEIRA et al., 2010a).

Sendo assim, o manejo das culturas certamente deverá ser diferenciado dentro de uma mesma área constituída por diferentes ambientes. Johnson e Richard (2005), ao estudarem solos cultivados com cana-de-açúcar por três anos, relataram alta correlação entre a variabilidade espacial dos atributos do solo e da cultura. Assim como Souza et al. (2004), observaram relação espacial entre os atributos do solo e a maioria dos nutrientes avaliados das folhas da cana-de-açúcar.

Na cultura do café, estudos indicaram que poderá existir correlação entre a distribuição e variação da produtividade e os atributos físicos, químicos e granulométricos do solo (SANCHES et al., 2009; BALASTREIRE et al., 2002b). Já na cultura da laranja, Leão et al. (2004) comprovou que há dependência espacial da qualidade dos frutos em relação às formas do relevo, apesar de diferentes condições de florada.

Assim, os vários estudos nessa área deixam claro que a relação solo-planta é muito sensível a diversos fatores, e que a busca por soluções mais eficientes no manejo operacional para o máximo aproveitamento dos recursos do solo depende do entendimento e delimitação desses fatores.

### **1.2.2. Suscetibilidade magnética e suas utilizações no estudo dos atributos do solo**

No estudo e avaliação quantitativa dos atributos do solo, a coleta e análise das amostras são as etapas mais intensivas e onerosas (McBRATNEY et al., 2002). No intuito de diminuir os custos com a obtenção de informações nos estudos em ciência do solo, alguns autores propuseram o uso de funções de pedotransferência, que são

cada vez mais utilizadas na agricultura moderna para estimar, indiretamente, atributos do solo de maneira simples, rápida e confiável.

Funções de pedotransferência podem ser definidas como modelos matemáticos utilizados para fazer estimativas de atributos dos solos a partir de outros atributos medidos com maior facilidade e baixo custo (McBRATNEY et al., 2002). A condutividade eletromagnética e resistividade elétrica são os métodos geofísicos mais utilizados para mapear a variabilidade espacial dos atributos do solo de maneira indireta (JOHNSON et al., 2001; BRENNING et al., 2008). Entretanto, as medições feitas por estas técnicas sofrem variações em função do teor de água no solo. Assim, alguns pesquisadores têm utilizado a suscetibilidade magnética (SM) (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000; ROYAL, 2001; SIQUEIRA et al., 2010a) na quantificação indireta de propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo.

A SM pode ser definida como o grau de magnetização de um material em resposta a um campo magnético aplicado. A SM é resultado da translação e rotação dos elétrons que constituem alguns minerais que estão presentes nos solos, nos sedimentos e nas rochas (CRAIK, 1995; LUQUE, 2008). Fatores como clima (EYRE; SHAW, 1994; DEARING et al., 2001; MAHER et al., 2003), material de origem (SINGER et al., 1996; FONTES et al., 2000; HANESCH et al., 2001), relevo (JONG et al., 2000), regime hídrico (MAHER, 1998), fauna/flora (DEARING et al., 1996), erosão, influência antrópica (HANESCH; SCHOLGER, 2005) e tempo (SINGER et al., 1992; WHITE; WALDEN, 1997), podem afetar a SM.

Diante destes aspectos alguns autores (SCHACHTSCHABEL et al., 1998; MAHER; THOMPSON, 1999) afirmaram que a SM é sensível às variações dos fatores e processos de formação do solo e pode ser expressa nas propriedades cristalográficas dos minerais presentes nos sedimentos e no solo. Como esses fatores e processos são específicos para cada local, a SM mostra-se uma promissora ferramenta no mapeamento destes locais (SIQUEIRA, 2010c), principalmente nos solos tropicais (Tabela 1).

**Tabela 1.** Suscetibilidade magnética de diferentes tipos de solos

| Solo | Material de origem  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | SM (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> Kg <sup>-1</sup> ) - Frações do solo |        |        |
|------|---------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|--------|--------|
|      |                     |                                    | Areia                                                                    | Silte  | Argila |
| 1    | Basalto             | 30                                 | 144,6                                                                    | 25,5   | 10,46  |
| 2    | Arenito Grupo Bauru | 3,4                                | 0,71                                                                     | 6,43   | 1,18   |
| 3    | Basalto             | 29,6                               | 191,46                                                                   | 166,52 | 53,17  |
| 4    | Basalto             | 22,9                               | 82,92                                                                    | 36,80  | 18,83  |
| 5    | Basalto             | 23,1                               | 45,25                                                                    | 22,22  | 4,58   |
| 6    | Basalto             | 24                                 | 39,71                                                                    | 24,30  | 0,77   |

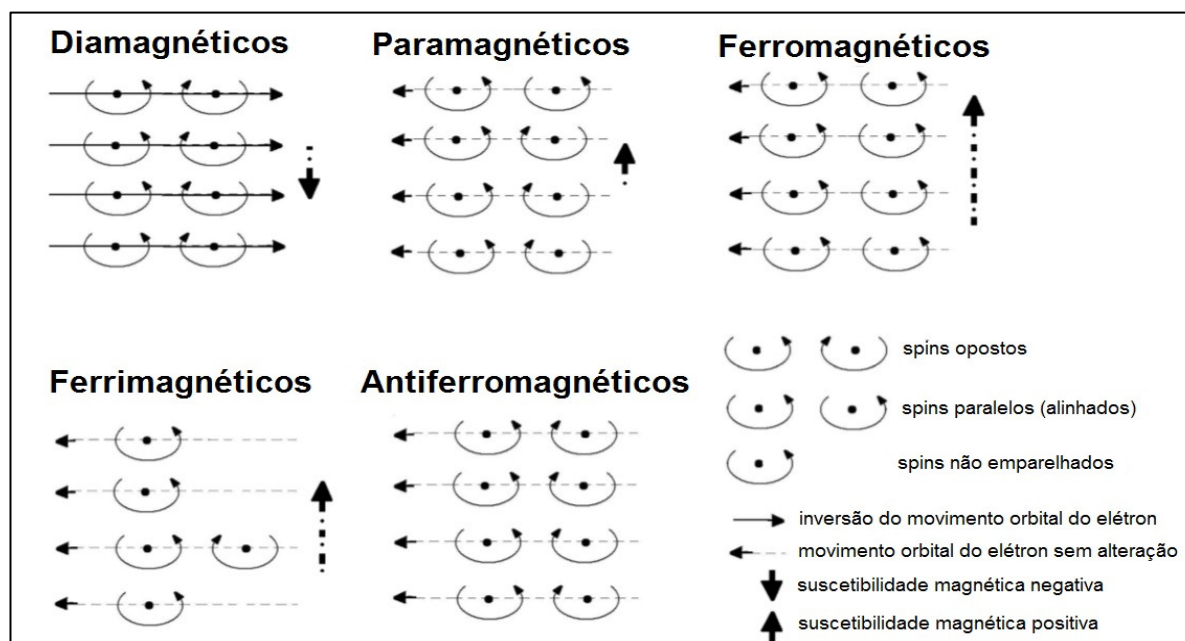
1. Latossolo distrófico A moderado; 2. Latossolo A proeminente; 3. Nitossolo (Typic Acrorthox); 4. Nitossolo A moderado (Typic Haplorthox); 5. Latossolo Vermelho álico A proeminente textura muito argilosa (Typic Acrohumox); 6. Latossolo Vermelho álico (Typic Acrohumox).

Fonte: modificado de SIQUEIRA, (2010c)

Cinco tipos básicos de comportamento magnético podem ser considerados: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo (Figura 1).

Segundo Santos (2010), nos minerais diamagnéticos, os átomos que compõem a cela unitária do mineral possuem as camadas eletrônicas preenchidas. Assim, o número de spins eletrônicos alinhados numa direção é igual ao número de spins eletrônicos na direção oposta. O campo magnético externo não exerce influência sobre os spins nesse caso, mas inverte o movimento orbital dos elétrons (exemplo: quartzo). Já nos minerais paramagnéticos, as camadas eletrônicas estão incompletas. A presença de um campo magnético externo faz com que os spins se alinhem e, mesmo após a retirada do campo magnético, alguns spins permanecem alinhados (exemplo: olivina).

Quanto aos minerais ferromagnéticos, esses são considerados um caso especial de paramagnetismo. Após a retirada do campo magnético, os spins permanecem alinhados, fazendo com que o mineral possua um grande valor de magnetização remanescente (exemplo: ferro e cobalto). Enquanto nos minerais ferrimagnéticos, os spins não estão emparelhados, assim prevalece o momento magnético do maior número de spins no mesmo sentido (exemplo: magnetita). Por fim, os minerais antiferromagnéticos não apresentam propriedades magnéticas (SIQUEIRA, 2010c).



**Figura 1.** Tipos de comportamento magnético na presença de um campo magnético externo (ímã). Fonte: SIQUEIRA, (2010c).

Um crescente interesse nas propriedades dos minerais do solo e no comportamento magnético dos mesmos tem sido observado nos últimos tempos.

Muito se aprendeu sobre o comportamento magnético dos minerais do solo desde os primeiros estudos de Le Borgne (1955) que postulou que a SM do solo foi, em geral, maior do que a do subsolo e do material de origem subjacente. Pode-se dizer que as propriedades magnéticas dos minerais do solo dependem essencialmente do teor Fe, pois, segundo Coey (1987), esse é o elemento mais abundante dentre os elementos magnéticos da crosta terrestre. Os minerais magnéticos mais importantes nos solos são a magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), presente na fração silte e areia fina e a maghemita ( $\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$ ), presente na fração argila. Quando estes conferem baixa expressão magnética aos solos, o comportamento magnético do solo passa a ser expresso pela hematita ( $\alpha\text{-Fe}_3\text{O}_4$ ) e pela goethita, ambos presentes na fração argila (MULLINS et al., 1977).

Diversas linhas de pesquisa, como a identificação da poluição do solo (PETROVSK'Y; ELLWOOD, 1999; LECOANET et al., 2001), investigação de climas pretéritos registrados por paleossolos (MAHER; THOMPSON, 1999, MAHER et al., 2003), identificação de limites mais precisos entre diferentes compartimentos do relevo (MATIAS, 2010), delineamento de áreas de solos hidromórficos (GRIMLEY et

al., 2004) e delimitação de áreas de manejo específico para cana de açúcar (MARQUES Jr., 2009; SIQUEIRA, 2010c), tem utilizado as medidas da SM dos solos.

O mapeamento da SM também vem se destacando como um dos métodos mais utilizados para fins ambientais (DEARING et al., 1996; GRIMLEY et al., 2004). Porém, segundo Becegato et al. (2005), no Brasil as pesquisas geofísicas em solos agrícolas ainda são muito incipientes. As propriedades magnéticas já foram utilizadas, nas décadas de 60 e 70, nos primeiros levantamentos de solos do estado de São Paulo, porém, com fins qualitativos, unicamente para distinguir solos provenientes de diferentes materiais de origem. Com as necessidades da agricultura atual por maior conhecimento da variabilidade dos atributos do solo, preocupação ambiental com o uso e o descarte adequados de reagentes laboratoriais e resíduos agroindustriais, a SM pode ser utilizada como ferramenta alternativa na quantificação indireta dos atributos do solo.

Mesmo com os diversos estudos sobre a utilização da SM na predição de atributos do solo, o desenvolvimento de funções de pedotransferência é uma tarefa difícil para aplicações em locais diferentes dos que elas foram desenvolvidas. Não se recomenda a utilização de funções de pedotransferência para além da região geomórfica, tipo de solo ou área de manejo específico, a partir da qual foi desenvolvida (McBRATNEY et al., 2002). Nesse sentido, são necessários estudos que possuam como objetivo investigar a correlação espacial da SM com atributos do solo em diferentes locais. Assim, os resultados são validados e a SM pode ser utilizada como função de pedotransferência pelo setor produtivo (SIQUEIRA, 2010c).

### **1.2.3. Geoestatística aplicada em ciências agrárias**

O estudo da variabilidade dos atributos do solo é de extrema importância para o refinamento das práticas de manejo e planejamento agrícola sustentável (CAMBARDELLA et al., 1994; SOUZA et al., 2003; CORÁ et al., 2004). Para realização de tais estudos pesquisadores têm utilizado métodos de classificação numérica, estatística multivariada, lógica fuzzy, geoestatística, métodos de fractais, entre outros (BURROUGH et al., 1994).

Embora todos estes métodos permitam inferir sobre a variabilidade espacial do solo, a dependência espacial entre as amostras somente pode ser modelada por meio da geoestatística (MULLA et al., 1992; WEBSTER, 2000). A geoestatística surgiu na África do Sul, quando o engenheiro Krige, trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias, se não levasse em conta a distância entre as amostras (KRIGE, 1951). Dentre muitos autores que contribuíram para este estudo, atribuí-se a G. Matheron, no início da década de 60, na França, a apresentação e a formalização da teoria das variáveis regionalizadas (BARBIERI, 2007).

As primeiras aplicações da geoestatística ocorreram na mineração (DAVID, 1970; JOURNEL, 1974), posteriormente em hidrologia (DELHOMME, 1976), até que esta técnica passou a ser utilizada em estudos da variabilidade de atributos do solo (VIEIRA et al., 1983; TRANGMAR et al., 1985; SOUZA et al., 1997; BERG; OLIVEIRA, 2000; SILVA et al., 2004).

Mesmo com diversos autores apontando a geoestatística para estudos da variabilidade dos atributos do solo a fim de auxiliar no planejamento agrícola, em muitos locais este ainda é feito somente com base em estatísticas como média e desvio padrão e não assumindo a interdependência entre as amostras (SIQUEIRA, 2010c). Isaaks e Srivastava, (1989) propuseram que as análises estatísticas clássicas que consideram a independência entre as amostras baseadas na média podem ser utilizadas, mas que apresentarão maior sucesso quando associadas com análises geoestatísticas.

Segundo Reichardt et al. (1986), de fato a estatística clássica e a geoestatística completam-se. Uma não exclui a outra, e perguntas não respondidas por uma, muitas vezes, podem ser respondidas pela outra. Sendo assim, a variabilidade espacial de atributos pode ser estudada por meio das ferramentas da geoestatística, que se fundamenta na teoria das variáveis regionalizadas, por meio do variograma, o qual expressa a dependência espacial entre as amostras (VIEIRA, 1997).

### 1.2.3.1. Variograma

Os variogramas determinam não só a dependência espacial existente, ou não, entre amostras, mas também o alcance dessa dependência (VIEIRA et al., 1981).

O gráfico que reproduz a existência ou não de dependência espacial de uma variável qualquer em estudo é denominado variograma. Ele pode ser representado analítica e/ou graficamente, sendo estimado pela equação 1.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad [1]$$

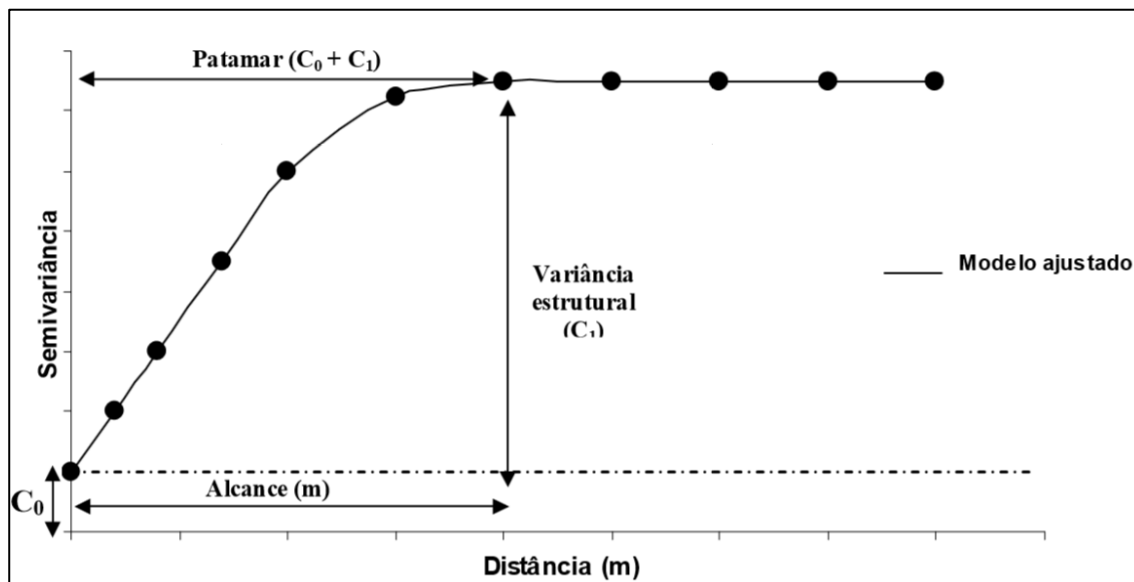
Em que,

$\hat{\gamma}(h)$ : é a variância estimada;

$N(h)$ : é o número de pares experimentais de dados separados pelo vetor  $h$ ;

$Z$ : representa os valores medidos para atributos do solo ou da cultura.

O variograma normalmente é representado pelo gráfico de  $\gamma(h)$  versus  $h$ . Ele começa no valor chamado de variância pepita ( $C_0$ ) e vai aumentando obedecendo a semivariância, até uma distância conhecida como alcance ( $a$ ), onde atinge o patamar ( $C_0 + C_1$ ), conforme mostrado na Figura 2.



**Figura 2.** Variograma experimental de um atributo qualquer do solo.

Para pesquisadores como Cambardella et al. (1994), Salviano et al. (1998) e Oliveira et al. (1999), a variância pepita ( $C_0$ ), que é um dos parâmetros avaliados pelo variograma, representa a variação não dependente espacialmente sobre o alcance examinado, ou seja, ela indica a variabilidade não explicada, podendo ser originada dos erros de medição ou de microvariações não detectadas quando é considerada a distância de amostragem utilizada.

Para Isaaks e Srivastava (1989), o patamar do variograma ( $C_0 + C_1$ ) indica que os dados da variável não dependem umas das outras espacialmente, ou seja, as variáveis são separadas por uma distância onde a semivariância não é modificada (variância espacial independente).

A razão entre o efeito pepita ( $C_0$ ) e o patamar ( $C_0 + C_1$ ) pode ser usada para definir classes distintas de aleatoriedade das variáveis do solo, seguindo uma classificação segundo Cambardella et al. (1994):

- 1)  $C_0/(C_0 + C_1) \leq 25 \%$ , variável apresenta forte dependência espacial;
- 2)  $C_0/(C_0 + C_1)$  entre 25 % e 75 %, variável apresenta moderada dependência espacial;
- 3)  $C_0/(C_0 + C_1) > 75 \%$ , variável apresenta fraca dependência espacial.

Para a geoestatística o alcance é a medida de distância em que a variável apresenta-se espacialmente dependente, isto é, ele é um indicador da distância de separação em que dentro dela existe dependência entre os pontos amostrados (ISAACKS; SRIVASTAVA, 1989). Em estudos da ciência do solo os modelos, exponencial e o esférico são os mais adequados ao variograma experimental.

### **1.2.3.2. Krigagem**

A estimativa de valores em pontos não amostrados a partir de seus vizinhos é realizada por um método geoestatístico de interpolação. Essa interpolação de dados é conhecida como krigagem. Isso se torna possível com o conhecimento do comportamento espacial da variável, o que é proporcionado pelo variograma. Neste estimador, pontos com maior proximidade do lugar onde foi realizada a amostragem de dados têm maior peso do que os pontos mais distantes. Da mesma forma

ocorrem com pontos agrupados e isolados, os primeiros tem um peso maior na estimativa do que os segundos (VIEIRA et al., 1983; BORGELT et al., 1994).

A krigagem, para possibilitar uma melhor estimativa de valores, utiliza um interpolador linear não tendencioso (JOURNAL; HUIJBREGTS, 1991; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; VIEIRA et al., 1983). Ela pode ser expressa sob a forma de mapas de isolinhas ou de superfície tridimensional.

O valor estimado para os locais não amostrados, pode ser definido pela equação 3.

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad [3]$$

Em que,

$\hat{Z}(x_0)$ : é o valor estimado para locais não amostrados ( $x_0$ );

$\lambda_i$  : é o peso atribuído a cada valor amostrado  $Z(x_i)$ ;

N: é o número de pontos vizinhos usados na estimativa;

$Z(x_i)$ : é o valor da variável  $Z$  no local  $x_i$ .

A construção de um mapa da área de estudo e a definição de isovalores definidos pela krigagem pela estimativa de valores em locais não amostrados podem ser de grande valia no planejamento agrícola e principalmente na visualização e interpretação do comportamento e distribuição espacial dos atributos do solo avaliados. Essas informações são extremamente importantes para a tomada de decisão sobre o manejo específico a ser adotado em cada área delimitada pelos mapas (BURGESS; WEBSTER, 1980).

### 1.3. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira Da Indústria Do Café – **ABIC**. Disponível em <<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=52>>. Acesso em dezembro 2012.

BALASTREIRE, L.A.; AMARAL, J.R.; LEAL, J.C.G.; BAIO, F.H.R. Agricultura de precisão: Variabilidade espacial dos teores de óleo e Proteína de grãos de soja (*Glycine Max*, [L.] Merrill). **Anais Avanços na Agricultura de precisão**, Piracicaba, p. 66-75, 2002b.

BARBIERI, D. M. **Formas do relevo e variabilidade espacial de atributos químicos e mineralógicos de um argissolo cultivado com cana-de-açúcar**. 2007, 83 p. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2007.

BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e suscetibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo v. 23, n. 4, p. 371-405, 2005.

BECKETT, P.H.T.; WEBSTER, R. Soil variability. **Soil fertility**, Farnham Royal, v.34, n.1, p.1-15, 1971.

BERG, M.V.D.; OLIVEIRA, J.B. Variability of apparently homogeneous soils capes in São Paulo state, Brazil: I. Spatial analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.377-391, 2000.

BERTOL, I.; LEITE, D.; GUADAGNIN, J. C.; RITTER, S. R. Erosão hídrica em um Nitossolo Háplico submetido a diferentes sistemas de manejo sob chuva simulada. II Perdas de nutrientes e carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.1045-1054, 2004.

BORGELT, S.C.; SEARCY, S.W.; STOUT, B.A.; MULLA, D.J. Spatially-variable liming rates - a method for determination. **ASAE**, St. Joseph, v.37, n.5, p.1499-1507, 1994.

BRENNING, A.; KOSZINSKI, S.; SOMMER, M., Geostatistical homogenization of soil conductivity across field boundaries. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, n. 3-4, p. 254-260, 2008.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal Soil Science**, Oxford, v.31, n. 3, p.315-31, 1980.

BURROUGH, P.A.; BOUMA, J.; YATES, S.R. The state of the art in pedometrics. **Geoderma**, Amsterdam, v.62, n.1-3, p.311-326, 1994.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

COEY, J. M. D. Magnetic properties of iron in soil iron oxides and clay minerals. In: STUCKI, J.W., GOODMAN, B. A.; SCHWERTMANN, U. (Ed.). **Iron in soils and clay minerals**. Dordrecht: Reidel Publishing Corporation, 1987. p. 217, 397-466.

CORÁ, J.E.; ARAUJO, A.V.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.1013-1021, 2004.

CORTEZ, L. A.; MARQUES Jr., J.; PELUCO, R. G.; TEIXEIRA, D. B.; SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na agricultura**, Botucatu, v.26, p.60-79, 2011.

CRAIK, D. **Magnetism, principles and applications**. Lisboa. John Wiley and Sons, 1995, 459p.

DAVID, M. The geostatistical estimation of porphyry-type deposits and scale factor problems. In: Pribam Mining Congress, Praga. **Proceedings**. Praga, p.91-109, 1970.

DEARING, J. A., LEES, J. A.; WHITE, C. Mineral magnetic properties of acid gleyed soils under oak and Corsican pine, **Geoderma**, n. 68, v. 68, p. 309–319. 1995.

DEARING, J. A.; LIVINGSTONE, I. P.; BATEMAN, M. D.; WHITE, K. Palaeoclimate records from OIS 8.0–5.4 recorded in loess-palaeosol sequences on the Matmata Plateau, southern Tunisia, based on mineral magnetism and new luminescence dating, **Quaternary International**, v. 76–77, p. 43–56. 2001.

DEARING, J.A.; HAY, K.L.; BABAN, S.M.K.; HUDDLESTON, A.S.; WELLINGTON, E.M.H.; LOVELAND, P.J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.127, p.728–734, 1996.

DELHOMME, J.P. **Kriging in hydrosiences**. Fontainebleau, Centre D'Informatique Geologique, 1976. 94p.

DOBERMANN, A.; PING, J. L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 1, p. 285-297, 2004.

EYRE, J. K.; SHAW, J. Magnetic enhancement of Chinese loess—the role of  $\gamma$  Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, **Geophysical Journal International**. v. 117, p. 265–271. 1994.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M. e CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**. Amsterdam, v.96, p.81-99, 2000.

GARRITY, D.P.; AGUSTIN, P.C. Historical land use evolution in a tropical acid upland agroecosystem Agriculture, **Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v.53, n.1, p.83- 95, 1995.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 2174-2180, 2000.

GRIMLEY, D.A.; ARRUDA, N.K.; BRAMSTEDT, M.W. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA. **Catena**. v.58, p.183–213, 2004.

HANESCH, M. e SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.161, n.1, p.50–56, 2005.

HANESCH, M., SCHOLGER, R.; DEKKERS, M. J. The application of fuzzy c –means cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for the detection of polluted sites, **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 26, p. 885–891. 2001.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JOHNSON, C.K., DORAN, J.W., DUKE, H.R., WIENHOLD, B.J., ESKRIDGE, K.M., SHANAHAN, J.F. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1829– 1837, 2001.

JOHNSON, R. M., RICHARD, E. P. Jr. Sugarcane Yield, Sugarcane Quality, and Soil Variability in Louisiana. **Agronomy Journal**, v.97, p.760–771, 2005.

JONG, E.; PENNOCK, D. J.; NESTOR, P. A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada, **Catena**, Amsterdam, v. 40, n. 3, p. 291-305, 2000.

JOURNEL, A.G. Geostatistical for conditional simulation of orebodies. **Economic Geology**, v.69, p.673-687, 1974.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**. 5 ed. London: Academic Press, 1991. 600p.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**. v.52, p.119-139, 1951.

LE BORGNE, E. Susceptibilite magnetique anormal du sol superficiel. Ann. **Journal of Geophysical Research**. v. 11, n. 113, p. 399–419. 1955.

LEÃO, G.A.L.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. **Relação entre atributos de uma vertente com Latossolos e qualidade de frutos cítricos**. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Ciência do Solo). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

LECOANET, H., L'ÉVÊQUE, F.; AMBROSI, J. P. Magnetic properties of saltmarsh soils contaminated by iron industry emissions (southeast France), **Journal of Applied Geophysics**. v. 48, p. 67–81. 2001.

LEGROS, J. P. **Mapping of the Soil**. Enfield, Jersey, Plymouth: Science Publishers. 411 p. 2006.

LUQUE, E. C. L. **Propiedades magnéticas de los óxidos de hierro en suelos mediterráneos**. 2008. 179 f. Tese (Doutorado) - Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2008.

MAHER, B. A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications, **palaeogeography. palaeoclimatology. palaeoecology**. v. 137, n. 30, p. 25–54, 1998.

MAHER, B. A.; ALEKSEEV, A.; ALEKSEEVA, T. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation, **Palaeogeography. palaeoclimatology. Palaeoecology**. v. 201, p. 321– 341, 2003.

MAHER, B.A.; THOMPSON, R. The magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences, in Quaternary Climates. In: **Environments and Magnetism** (eds MAHER, B.A. e THOMPSON, R.). University Press, Cambridge, p. 81–125, 1999.

MALLARINO, A. P.; MAZHAR. U. H.; WITTRY, D.; BERMUDEZ, M. Variation in Soybean Response to Early Season Foliar Fertilization among and within Fields, **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, n. 6, p.1220-1226, 2001.

MARQUES Jr, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

MARQUES JÚNIOR, J.; LEPSCH, I.F. Depósitos superficiais neocenoicos, superfícies geomórficas e solos em Monte Alto-SP. **Geociência**, São Paulo, v.19, p.265-281, 2000.

MATIAS, S. S. R. **Suscetibilidade magnética e sua associação com atributos do solo e do relevo em uma topossequência de latossolos**. 2010. 111f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

MAULE, R. F.; MAZZA, J. A.; MARTHA Jr.; BUENO, G. Produtividade agrícola de cultivares de cana-de-açúcar em diferentes solos e épocas de colheita. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 295-301, 2001.

McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, n. 1-2, p. 3-52, 2003.

McBRATNEY, A.; MYNASNY, B.; STEPHEN R. CATTLE, R. WILLEM VERVOORT. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam. v. 109, p. 41-73. 2002.

MILLER, M. P.; SINGER, M. J.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of wheat yield and soil properties on complex hills. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 52, n. 5, p. 1133-1141, 1988.

MULLA, D.J.; BATÍ, A.U.; HAMMOND, M.W.; BENSON, J.A. A comparison of winter wheat yield and quality under uniform versus spatially variable fertilizer management. ***Agriculture Ecosystems e Environment***, Amsterdam, v.38, n.2, p.301-311, 1992.

MULLINS, B. A. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science - a review. ***Journal of Soil Science***, v.28, p.223-246, 1977.

OLIVEIRA, J.J.; CHAVES, L.H.G.; QUEIROZ, J.E. ; LUNA, J.G.de. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. ***Revista Brasileira de Ciência do Solo***, Campinas, v. 23, n.4, p. 783-789, 1999.

PETROVSKY, E.; ELLWOOD, B. B. Magnetic monitoring of air-, land-, and waterpollution, in quaternary climates, In: MAHER, B. A.; THOMPSON, R. (ed.). ***Environments and magnetism***, University Press, Cambridge. 1999. p. 279-322.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S.R.; LIBARDI, P.L. Variabilidade espacial de solos e experimentação de campo. ***Revista Brasileira de Ciência do Solo***, Viçosa, v. 10, n. 1, p. 1-6, 1986.

SALVIANO, A. A. C.; VIEIRA, S. R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos de solo e de *Crotalaria juncea* L. em área severamente erodida. ***Revista Brasileira de Ciência do Solo***, Viçosa, v.22, p.115-122, 1998.

SANCHEZ, M. G. B. ***Relação solo relevo em áreas sob cultivo de café no sudoeste de Minas***. 2009.90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

SANTOS, H. L. ***Variabilidade espacial dos atributos do solo, erosão e suscetibilidade magnética de uma vertente em Gilbués-PI***. 2010. 74 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, H. P.; BRÜMMER, G.; HARTGE, K. H. SCHWERTMANN, U. ***Lehrbuch der Bodenkunde (Scheffer/Schachtschabel)***. 14th ed, Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, p. 494. 1998.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. ***Ciência Rural***, Santa Maria, v.34, n.2, p.399-406, 2004.

SILVEIRA, P. M.; CUNHA, A. A. Variabilidade de micronutrientes, matéria orgânica e argila de um latossolo submetido a sistemas de preparo. ***Pesquisa Agropecuária Brasileira***, Brasília, v.37, p.1.325-1.332, 2002.

SINGER, M. J.; FINE, P.; VEROSUB, K. L.; CHADWICK, O. A. Time dependence of magnetic susceptibility of soil chronosequences on the California coast, **Quaternary Research**. v. 37, p. 323–332. 1992.

SINGER, M. J.; VEROSUB, K. L.; FINE, P.; TENPAS, J. A conceptual model for the enhancement of magnetic susceptibility in soils, **Quaternary International**. v. 34-36, p. 243–248. 1996.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES Jr., J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, Oxford, v.26, p.425-431, 2010a.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, 55-66, 2010b.

SIQUEIRA, D.S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2010. 75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010c.

SOUZA, C.K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M.V.; PEREIRA, G.T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.1067-1074, 2003.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.3, p.367-372, 1997.

SOUZA, Z.M.; SILVA, M.L.S.; GUIMARÃES, G.L.; CAMPOS, D.T.S.; CARVALHO, M.P.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.699-707, 2001.

SOUZA., Z.M.; MARQUES.JÚNIOR., J.; PEREIRA., G.T.; MOREIRA., L.F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, p.1.763-1.771, 2004.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p.45-93, 1985.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.45, n.6, p. 1040-1048, 1981.

VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de argila, silte e atributos químicos em uma parcela experimental de um Latossolo Roxo de Campinas (SP). **Bragantia**, Campinas, v.56, n.1, p.181-190, 1997.

WEBSTER, R. Is soil variation random? **Geoderma**, Amsterdam, v.97, n.1-2, p.149-163, 2000.

WHITE, K.; WALDEN, J. The rate of iron oxide enrichment in arid zone alluvial fan soils, Tunisian southern atlas, measured by mineral magnetic techniques, **Catena**, v. 30, 215- 227. 1997.

WILDING, L.P.; DREES, L.R. Spatial variability and pedology. In: **Pedogenesis and soil taxonomy**: I. Concepts and interactions. New York: Elsevier, 1983. p.83-116.

## **CAPÍTULO 2. ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO NA CULTURA DO CAFÉ POR SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA, ESPESSURA DO SOLO E ATRIBUTOS DA PLANTA**

**RESUMO** – O mapeamento da distribuição espacial dos atributos físicos e químicos do solo, relacionados à produtividade agrícola, permite identificar zonas de manejo específico para as culturas, garantindo maior produtividade com menor custo de produção. Assim, o objetivo deste trabalho foi discriminar áreas de manejo específico para a cultura do café utilizando os atributos físicos e químicos, a suscetibilidade magnética (SM) e a espessura do solo. A área de estudo, de aproximadamente 39 hectares, está localizada no município de Matão, estado de São Paulo, na Fazenda Cambuhy Agrícola Ltda, onde o solo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico. A área foi ocupada nos últimos 25 anos exclusivamente por café, cuja variedade estudada foi a *Coffea arabica*, cultivar Catuaí Amarelo IAC 62 com 7 anos de idade e espaçamento de plantio 3,5 x 0,50 m. Para estabelecer os pontos de coleta, foi gerada uma malha amostral sob a área, perfazendo um total de 173 pontos. Em cada ponto, foram retiradas amostras de solo nas profundidades de 0,0-0,20 m e 0,60-0,80 m. Também foram avaliados os atributos de produção, maturação e de classificação do café. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva e geoestatística. A área foi dividida em dois ambientes, A e B, sendo que a maior produtividade de grãos de café e com melhor classificação quanto ao tipo, foi observada no ambiente A, cuja SM é maior e a espessura do solo é menor. A aplicação das técnicas de mapeamento e diagnóstico de atributos do solo e da planta no campo mostrou-se altamente viável, já que a aplicação de fertilizantes em taxa variável resultou em diminuição dos custos de produção, além de proporcionar melhores condições de produtividade no ambiente cujos atributos do solo são responsivos ao investimento.

**Palavras-chave:** *Coffea arabica*, variabilidade espacial, variograma, krigagem.

## 2.1. INTRODUÇÃO

O Brasil tem se destacado como o maior produtor e principal exportador de café. Em 2012, o país produziu 50,48 milhões de sacas de café e, aproximadamente, 29 milhões de sacas da safra de 2011 foram exportadas (ABIC, 2012). O consumo interno de café vem crescendo anualmente. Entre maio/2011 e abril/2012, o Brasil consumiu 20 milhões de sacas de café, o que representa acréscimo de 3,05% em relação ao período anterior correspondente. Embora a produção de café tenha crescido no Brasil, o país ainda não atingiu uma produtividade satisfatória, sendo a produtividade média de 23,8 sacas ha<sup>-1</sup>, considerada baixa pelo setor (CONAB, 2013). Diversos são os fatores que afetam essa média, sendo alguns deles a falta de novas tecnologias aplicadas e a deficiência no conhecimento do ambiente de produção, seja ele relacionado ao solo ou à planta propriamente dita.

O aumento constante da demanda de café gera a necessidade de incremento na produtividade e a redução de custos operacionais para que a cultura também se mantenha economicamente viável. Para se atingir esse resultado é adequado que a eficiência em diagnose, recomendação e aplicação das técnicas operacionais sejam extremas.

Grande parte dos custos de uma lavoura de café está relacionada com o manejo adequado do solo e de todos os elementos que o compõem, sendo essencial que se mantenha em equilíbrio com as necessidades da planta e o ambiente em que ela está inserida. O entendimento dessas relações depende de estudos da variabilidade de todos esses componentes e de como a planta reagirá às diferentes interações que naturalmente geram áreas com diferentes potenciais de produção, tanto quantitativos quanto qualitativos. Técnicas de mapeamento sustentáveis e economicamente viáveis são consideradas soluções altamente indicadas para atender a esta necessidade (SANCHEZ et al., 2005, SANCHEZ et al., 2012).

Uma dessas técnicas, a suscetibilidade magnética (SM), baseia-se na medição da magnetização de um material em resposta a um campo eletromagnético aplicado em um solo mineral. A SM é um atributo comum desse tipo de solo, que confere as características dos minerais presentes nas rochas e no solo, cuja

magnitude depende da concentração e características dos minerais, tais como composição, estrutura espacial do cristal e tamanho (VEROSUB; ROBERTS, 1995). Segundo Maher e Thompson (1999), os minerais com capacidade magnética armazenam arquivos naturais contendo registros dos fatores e processos de formação do solo. Sendo assim, a medição da SM é capaz de dar indícios claros sobre as características gerais dos minerais dos solos.

Utilizando-se dessas características é possível ainda aplicar funções de pedotransferência, que se baseiam em modelos matemáticos capazes de estimar valores de outros atributos relacionados ao solo analisado, diminuindo assim a necessidade de gastos com análises laboratoriais convencionais.

A amostragem convencional para mapeamento do solo ainda exige grande quantidade de amostras para que o resultado do mapa seja confiável, o que limita seu uso devido ao alto custo das análises.

Segundo Dematê et al. (2007), a pouca aplicabilidade da agricultura de precisão na América do Sul é atribuída principalmente ao elevado custo das análises de solos. Dearing et al. (1996) mencionaram que a SM é ideal para a realização de estudos que requerem uma grande quantidade de amostras, sem que haja aumento nos custos e no tempo de análise (DEARING et al., 1996, ROYALL, 2001, SIQUEIRA et al., 2010b).

Estudos indicaram que numa mesma unidade de mapeamento de solo existe considerável variabilidade espacial dos seus atributos (CAMARGO et al., 2008). No entanto, ainda há poucos trabalhos que correlacionam a qualidade de bebida e o estudo da variabilidade dos atributos do solo por meio da suscetibilidade magnética e espessura do solo. Sanchez et al. (2009), ao medir os atributos de variabilidade do solo e da planta, observaram que pequenas variações de relevo, teor de argila e ferro no solo podem ser indicativos ambientais para delimitação de áreas de manejo específico de solo e produção de café. A suscetibilidade magnética também foi estudada por Santos et al. (2011) para identificar diferentes compartimentos na paisagem de uma vertente. Os autores identificaram três compartimentos distintos para o manejo da erodibilidade do solo, mostrando a eficácia da técnica para delimitar áreas com diferentes potenciais de manejo. Já Navas et al. (2011) encontraram relação positiva entre a SM e indicadores do solo para prever

comportamentos erosivos e de baixa utilização agrícola a fim de promover a sustentabilidade das terras do sistema árido e semi árido.

Cortez et al. (2011) utilizaram a SM em uma área de laranja para identificar os atributos do solo e da planta em relação ao relevo da área. Os autores encontraram correlação de todos os atributos estudados com os valores de SM, principalmente com aqueles que interferem na produtividade e qualidade do fruto.

A validação de estudos envolvendo a suscetibilidade magnética tem demonstrado que há grande potencial de uso de técnicas alternativas como ferramenta de diagnóstico e caracterização de atributos químicos e físicos de solo.

O objetivo deste trabalho foi discriminar áreas de manejo específico para a cultura do café utilizando suscetibilidade magnética do solo e a classificação numérica no contexto da relação solo-paisagem, avaliando conjuntamente o potencial de ganho econômico do manejo localizado.

## **2.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.2.1. Caracterização da área e malha de amostragem**

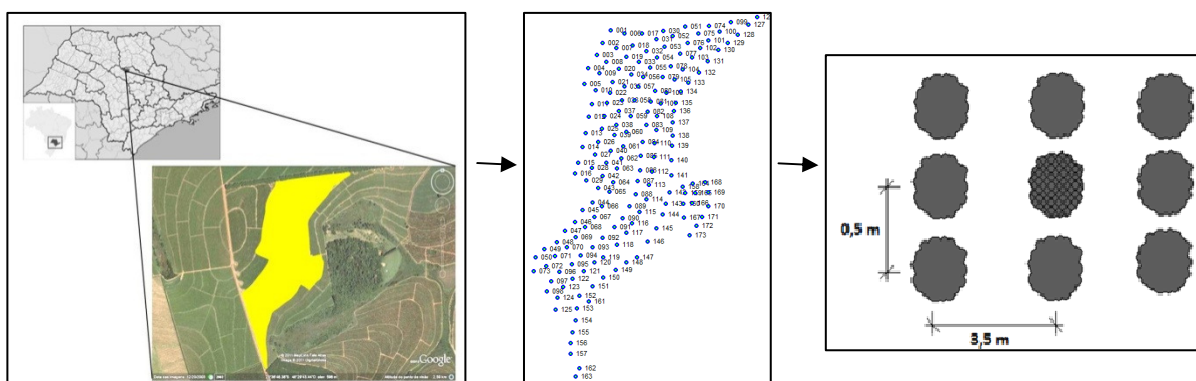
A área de estudo localiza-se no município de Matão, estado de São Paulo, entre a latitude de 21° 36' S, e longitude de 48° 29' W, altitude variando entre 590 a 615 metros (Figura 1). O clima, de acordo com a classificação de Köppen, é o Aw (tropical), cuja temperatura média do mês mais frio (julho) é de 18°C, e a do mês mais quente (fevereiro) é de 25° C, com temperatura média anual de 22 °C. A pluviosidade média é de 1600 mm por ano. Segundo classificação realizada pelo Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), a região está em região apta para o cultivo de café

A geologia é representada por sedimentos do Grupo Bauru (Formação Adamantina). A porção mais elevada da região é caracterizada pela presença de topos, com encostas convexas de pouca inclinação (2-5%). Segundo os mapas de solos elaborados pela empresa Cambuhy, a área de estudo está caracterizada pelo Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, A moderado, textura médio-argilosa,

variando o teor de ferro total ( $\text{Fe}_2\text{O}_5$ ) de 3% na parte mais alta da área, para 2,6% na parte mais baixa.

A área de estudo, de aproximadamente 39 hectares, foi escolhida mediante representatividade fisiográfica regional, onde nos últimos 25 anos foi ocupada exclusivamente por café, cuja espécie estudada foi a *Coffea arabica*, cultivar Catuaí Amarelo IAC 62 com 7 anos de idade e espaçamento de plantio 3,5 x 0,50 m. Desde o plantio, a cultura foi conduzida com sistema de fertirrigação por gotejamento. Para estabelecer os pontos de coleta, foi gerada uma malha amostral sob a área, com intervalos regulares de 45 m, perfazendo um total de 173 pontos (Figura 1).

Em cada um dos pontos da malha, a unidade amostral foi composta por nove plantas de café. A coleta de amostras de solo foi realizada sob a copa da planta central da unidade amostral nas profundidades de 0,0-0,20 m e 0,60-0,80 m, onde também foi realizada a avaliação da espessura do solo.



**Figura 1.** Localização da área, malha de amostragem, unidade amostral.

### 2.2.2. Análise dos atributos do solo

Todas as amostras coletadas na malha e nas trincheiras foram submetidas à análise granulométrica utilizando solução de  $\text{NaOH}$  0,1 N como dispersante químico e agitação com aparato de baixa rotação (DAY, 1965). A argila foi determinada pelo método da pipeta, a areia grossa e fina foram separadas por tamisação e o silte foi calculado por diferença. O pH foi determinado potenciometricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo: água e solo:  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol.L<sup>-1</sup>. Cálcio, magnésio e potássio trocáveis e o fósforo disponível foram extraídos utilizando-se o método da resina

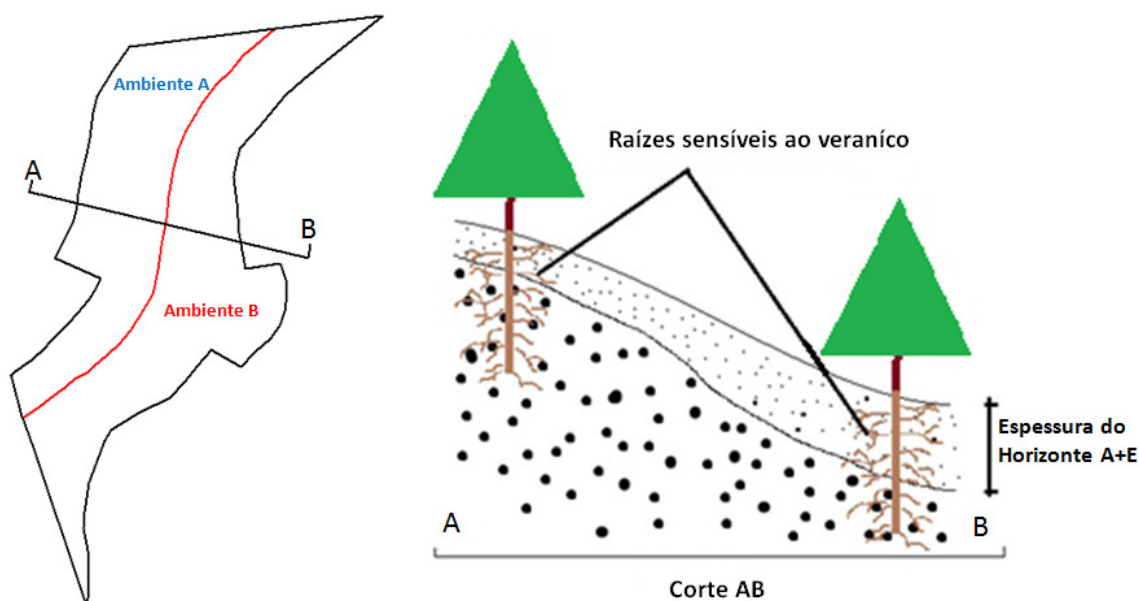
trocadora de íons (Raij et al., 1987). A acidez trocável ( $\text{Al}^{3+}$ ) foi determinada seguindo a metodologia de Raij e Zullo (1977) e o carbono orgânico segundo Embrapa (1997).

A suscetibilidade magnética foi analisada pelo medidor MS2, da Bartington Instruments Ltd., o qual foi acoplado a um sensor de laboratório MS2B de duas frequências. Com este sensor foi possível medir a suscetibilidade magnética utilizando campo magnético baixo e alternado, de intensidade de  $-80 \text{ A m}^{-1}$  ( $10^{-4} \text{ T}$ ) e de frequência variada (SIQUEIRA et al., 2010).

A avaliação da espessura do solo horizonte (A+E) foi realizada pela média de três tradagens profundas em cada ponto amostrado. As profundidades foram medidas por avaliação tátil dos teores de argila/areia, até que fosse observada textura argilosa.

Com base nos resultados da geoestatística e de algumas pesquisas utilizando a espessura do solo (SANCHEZ et al., 2009) e suscetibilidade magnética (CORTEZ et al., 2011) na identificação de compartimentos com diferentes padrões de variabilidade, a área foi dividida em dois ambientes (Figura 2), que apresentam diferentes profundidades dos horizontes A+E medidos através de tradagem profunda.

Na divisão aparente, a média de profundidade do horizonte A+E no ambiente A é 10 cm menor do que no ambiente B (Figura 2). Com base nessa divisão, as demais avaliações foram comparativas entre os dois ambientes.



**Figura 2.** Divisão da área em dois ambientes.

### 2.2.3. Análises dos atributos da planta

Os seguintes atributos qualitativos e quantitativos da cultura do café foram analisados: (i) produtividade ( $\text{sacas.ha}^{-1}$ ), calculada pela média de produção das 9 plantas da unidade amostral e posterior extrapolação para produtividade por hectare, (ii) porcentagens de grãos retidos nas peneiras 14, 16 e 17, (iii) porcentagens dos grãos nos graus de maturação verde, verde cana, cereja, passa e seco. Esses valores foram obtidos pela separação de um litro de café em côco, logo que a amostra era recebida no terreiro para secagem. A medição foi feita com ajuda de uma proveta graduada e os grãos foram classificados segundo seu grau de maturação. Cada um dos atributos foi medido separadamente e seu respectivo valor em porcentagem calculado. (iv) classificação quanto ao tipo de café segundo a tabela COB (Classificação Oficial Brasileira).

A classificação do café por tipo foi feita com base na contagem dos grãos defeituosos e das impurezas contidos numa amostra de 300 g de café beneficiado. Esta classificação obedece à Tabela Oficial para Classificação, na qual cada tipo de café corresponde a um número maior ou menor de defeitos encontrados em sua amostra.

Os grãos considerados imperfeitos são aqueles com defeitos intrínsecos, tais como grãos pretos, ardidos, verdes, chochos, mal granados, quebrados e brocados. Já as impurezas são consideradas defeitos extrínsecos, tais como cascas, paus, pedras, cafés em coco ou marinheiros, com pergaminho. Cada um desses grãos imperfeitos ou impurezas corresponde a uma medida de equivalência de defeitos. Ao final da classificação foram somados os defeitos e o valor correspondente foi encontrado na tabela COB.

Foi realizado também o comparativo de possível ganho econômico entre a recomendação baseada no manejo nutricional convencional e o manejo separado por ambientes. A recomendação convencional foi baseada na média dos valores das análises de solo para todo o terreno, já o manejo por ambientes foi determinado por meio da confecção de mapas de fertilidade para cada ambiente, em que foi possível avaliar locais de maior e menor necessidade de correção e ou fertilização com calcário, cloreto de potássio e MAP (Fosfato monoamônico). Foram calculadas

também as porcentagens de sacas de café produzidas com a classificação Tipo 6 para melhor de cada ambiente, para posterior simulação de venda na cotação de valor na Bolsa de Nova York. Os resultados foram comparados segundo o ganho relativo entre economia em insumos e maior quantidade de venda de café de qualidade.

#### **2.2.4. Análise estatística dos dados: análise descritiva e geoestatística**

Os dados foram submetidos à análise estatística para determinação da média, coeficiente de variação e correlação. Para a caracterização da variabilidade espacial, foi utilizada a análise geoestatística (MATHERON, 1963; VIEIRA et al., 1983; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Sob suposição da hipótese intrínseca o semivariograma experimental foi estimado pela Eq. (1).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

sendo:

$\gamma(h)$  - valor da semivariância para uma distância  $h$ ;  $N(h)$  - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância;  $Z(x_i)$  - valor do atributo  $Z$  na posição  $x_i$ ;  $Z(x_i+h)$  - valor do atributo  $Z$  separado por uma distância  $h$  da posição  $x_i$ .

Os semivariogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da variância dos primeiros lags, presença de patamar claramente definido (BURROUGH; McDONNEL, 2000) e validados pela técnica de validação cruzada. Após o ajuste dos modelos matemáticos permissíveis foi feita a interpolação dos dados por meio da krigagem.

### 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A maior parte das médias dos atributos físicos e químicos, de produtividade e tipo de café apresentou diferença significativa quando separadas por ambientes. Esses resultados mostram que a utilização de técnicas como a medida da espessura do solo e da suscetibilidade magnética são eficazes para estudos de variabilidade do solo (Tabela 1).

Os resultados sugerem que, dividir os ambientes mediante estudo dos atributos do solo, pode auxiliar no planejamento da colheita, pois há uma tendência dos grãos de café, cujas plantas estão localizadas em diferentes ambientes, alcançarem o ponto de colheita em períodos distintos. Resultados semelhantes foram obtidos por Sanchez et al. (2009) que obtiveram diferentes tipos de peneiras e graus de maturação dos grãos de café nos diferentes ambientes de sua área de estudo.

A produção de grãos cereja, verde cana e verde foi maior no ambiente A, demonstrando que os atributos do solo encontrados nesse ambiente favoreceram maior produtividade com qualidade. O ambiente A propiciou condições mais favoráveis de crescimento vegetativo e de enchimento de grãos, quando comparado ao ambiente B. Isso se deve ao fato de no ambiente A, o horizonte B textural, rico em argila, situar-se mais próximo à superfície, o que favorece maior retenção de água e, conseqüentemente, maior disponibilidade de nutrientes em detrimento do ambiente B, mais arenoso, onde a drenagem da água é mais rápida (Tabela 2).

O ambiente B, por estar em cota de menor valor em relação ao ambiente A, é considerado área deposicional, em que é possível inferir a tendência de maior acúmulo de areia deslocada por erosão natural do terreno.

Dentre os atributos estudados, a SM foi um dos que apresentou maior coeficiente de variação. Isto reflete a grande sensibilidade deste atributo aos processos do solo que variam continuamente na paisagem. Segundo Mathé et al. (2006), a SM pode ser utilizada para avaliar minerais do solo funcionando como um micro indicador das condições do solo.

**Tabela 1.** Estatística descritiva para os atributos de solo.

| Atributos                                              | Ambientes | 0,0 - 0,20 m |       | 0,60 - 0,80 m |        |
|--------------------------------------------------------|-----------|--------------|-------|---------------|--------|
|                                                        |           | Média        | CV    | Média         | CV     |
| P (mg dm <sup>-3</sup> )                               | A         | 48,14 b      | 58,05 | 4,397 a       | 42,67  |
|                                                        | B         | 70,62 a      | 51,45 | 5,50 a        | 102,61 |
| CO (g dm <sup>-3</sup> )                               | A         | 5,82 b       | 16,53 | 4,30 a        | 15,83  |
|                                                        | B         | 6,98 a       | 26,86 | 4,11 a        | 30,33  |
| pH (CaCl <sub>2</sub> )                                | A         | 5,30 b       | 6,64  | 5,28 a        | 3,7    |
|                                                        | B         | 5,51 a       | 7,06  | 5,37 a        | 4,64   |
| K (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )                | A         | 1,95 b       | 30,24 | 2,81 a        | 46,11  |
|                                                        | B         | 2,24 a       | 33,89 | 2,67 a        | 34,64  |
| Ca (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )               | A         | 29,56 a      | 37,07 | 23,47 a       | 23,37  |
|                                                        | B         | 36,04 a      | 54,19 | 24,82 a       | 32,56  |
| Mg (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )               | A         | 14,94 b      | 51,91 | 11,82 a       | 25,86  |
|                                                        | B         | 19,67 a      | 54,92 | 12,59 a       | 42,42  |
| H+Al (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )             | A         | 24,53 a      | 23,57 | 22,24 a       | 13,12  |
|                                                        | B         | 22,20 a      | 32,23 | 20,29 b       | 17,15  |
| Argila (g kg <sup>-1</sup> )                           | A         | 157,3 a      | 17,25 | 325,60 a      | 12,23  |
|                                                        | B         | 167,6 a      | 24,37 | 346,40 b      | 12,63  |
| Areia (g kg <sup>-1</sup> )                            | A         | 801,9 a      | 3,23  | 634,30 a      | 6,61   |
|                                                        | B         | 791,3 a      | 5,21  | 630,20 a      | 7,84   |
| Silte (g kg <sup>-1</sup> )                            | A         | 40,7 a       | 23,13 | 39,90 a       | 25,51  |
|                                                        | B         | 41,0 a       | 28,17 | 23,20 b       | 98,81  |
| SM (10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | A         | 174,79 a     | 34,23 | 142,00 a      | 34,49  |
|                                                        | B         | 125,91 b     | 37,86 | 109,00 b      | 32,73  |
| Espessura do Solo (cm)                                 | A         | 44,51 b      | 17,4  | 44,51 a       | 17,4   |
|                                                        | B         | 52,6 a       | 19,95 | 52,6 b        | 19,95  |

CV – Coeficiente de Variação, P – Fósforo, CO – Carbono Orgânico, K – Potássio, Ca – Cálcio, Mg – Magnésio, H+Al – Hidrogênio + Alumínio, SM – Suscetibilidade Magnética. Valores seguidos pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

**Tabela 2.** Estatística descritiva dos atributos de produção e tipo de café.

| Atributos                               | Ambientes | Média    | CV    |
|-----------------------------------------|-----------|----------|-------|
| Produtividade (sacas ha <sup>-1</sup> ) | A         | 25,69 a  | 58,67 |
|                                         | B         | 13,70 b  | 77,22 |
| Verde (%)                               | A         | 12,30 a  | 43,14 |
|                                         | B         | 9,04 b   | 47,50 |
| Verde Cana (%)                          | A         | 9,29 b   | 34,36 |
|                                         | B         | 11,38 a  | 46,99 |
| Cereja (%)                              | A         | 26,97 a  | 16,98 |
|                                         | B         | 22,05 b  | 31,12 |
| Passa (%)                               | A         | 26,46 a  | 17,18 |
|                                         | B         | 26,24 a  | 33,33 |
| Seco (%)                                | A         | 24,99 a  | 21,10 |
|                                         | B         | 24,49 a  | 32,76 |
| Peneira 17                              | A         | 31,33 b  | 25,78 |
|                                         | B         | 35,80 a  | 16,75 |
| Peneira 16                              | A         | 22,99 a  | 11,63 |
|                                         | B         | 21,26 b  | 12,97 |
| Peneira 14                              | A         | 35,24 a  | 15,45 |
|                                         | B         | 32,19 b  | 11,72 |
| Tipo de café                            | A         | 134,29 b | 16,49 |
|                                         | B         | 149,90 a | 17,43 |

CV – Coeficiente de Variação. Valores seguidos pela mesma letra na coluna não se diferem pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade.

Foi realizada correlação entre espessura do solo e a suscetibilidade magnética com os atributos de solo e da planta (Tabela 3 e 4). Os atributos P, CO, pH, Ca, Mg e areia obtiveram correlação negativa com a suscetibilidade magnética na profundidade de 0,0 - 0,2 m. Isso significa que quanto maior a SM, menor a quantidade desses atributos no solo. A argila apresentou correlação positiva com a SM na profundidade de 0,6 - 0,8 m à 1% de probabilidade.

A relação entre nutrientes de solo e sua quantificação indireta também foi estudada por Hua et al. (2006), que mediram a SM em áreas com uso agrícola intensivo e comprovaram que os maiores valores de SM estavam relacionados com as maiores concentrações de determinados nutrientes em toda a extensão do terreno, indicando que a presença e a quantidade dos elementos químicos do solo podem ser estimados pela SM.

Os atributos P, CO, pH, K, Ca, Mg e silte na profundidade de 0,0 - 0,2 m correlacionam positivamente com a espessura do solo. O ambiente B, onde o horizonte A+E é mais profundo, não favorece a absorção dos nutrientes estudados,

havendo, portanto, maior quantidade de nutrientes nesses solos e não necessariamente maior produtividade e qualidade dos grãos, fato este que denota a importância de uma análise completa dos atributos do solo. Já a argila, na profundidade de 0,6 - 0,8 m apresentou correlação negativa com a espessura do solo. Isso se deve ao fato de que quanto maior a espessura do solo, mais profunda é a camada argilosa. Gârbacea e Ioanes (2010) obtiveram resultados semelhantes quanto à relação entre a SM e a profundidade do solo. Esses pesquisadores observaram que, por meio da SM é possível inferir as características dos perfis do solo. Correlações significativas entre a SM e os atributos do solo como teor de argila, matéria orgânica, pH, Cu, Co, Ni e Zn também foram observadas por Hanesch e Scholger (2005).

Os atributos produtividade e grãos cereja, verde e peneiras 14, 16, 17 correlacionaram-se significativamente com a SM e com a espessura do solo (Tabela 4). Esses resultados corroboram ao fato de no ambiente A, que resultou em melhor produtividade e qualidade dos grãos de café, a argila encontrar-se mais próxima à superfície devido à menor espessura do solo e desse fator também interferir nos valores de SM conforme explanado anteriormente.

**Tabela 3.** Correlação da Suscetibilidade Magnética e espessura do solo com os atributos físicos e químicos nas profundidades de 0,0-0,20 e 0,60-0,80 m.

| Atributos                                              | 0,0 - 0,20 m         |                      | 0,60 - 0,80 m        |                      |
|--------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                                                        | SM                   | Espessura do         | SM                   | Espessura do         |
| P (mg dm <sup>-3</sup> )                               | -0,202**             | 0,294**              | 0,001 <sup>NS</sup>  | 0,092 <sup>NS</sup>  |
| CO (g dm <sup>-3</sup> )                               | -0,115 <sup>NS</sup> | 0,415**              | 0,195**              | -0,103 <sup>NS</sup> |
| pH (CaCl <sub>2</sub> )                                | -0,254**             | 0,452**              | -0,036 <sup>NS</sup> | -0,076 <sup>NS</sup> |
| pH (H <sub>2</sub> O)                                  | -0,254**             | 0,452**              | -0,036 <sup>NS</sup> | -0,076 <sup>NS</sup> |
| K (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )                | 0,050 <sup>NS</sup>  | 0,184*               | 0,124 <sup>NS</sup>  | -0,061 <sup>NS</sup> |
| Ca (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )               | -0,193*              | 0,717**              | -0,002 <sup>NS</sup> | -0,047 <sup>NS</sup> |
| Mg (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )               | -0,240**             | 0,782**              | 0,057 <sup>NS</sup>  | -0,047 <sup>NS</sup> |
| H+Al (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )             | 0,268**              | -0,249**             | 0,124 <sup>NS</sup>  | 0,006 <sup>NS</sup>  |
| Areia (g kg <sup>-1</sup> )                            | -0,137 <sup>NS</sup> | -0,099 <sup>NS</sup> | 0,061 <sup>NS</sup>  | 0,019 <sup>NS</sup>  |
| Silte (g kg <sup>-1</sup> )                            | 0,164*               | 0,273*               | -0,146 <sup>NS</sup> | 0,092 <sup>NS</sup>  |
| Argila (g kg <sup>-1</sup> )                           | 0,088 <sup>NS</sup>  | 0,018 <sup>NS</sup>  | 0,202**              | -0,249**             |
| SM (10 <sup>-8</sup> m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> ) | -                    | -0,121 <sup>NS</sup> | -                    | -0,140 <sup>NS</sup> |

P – Fósforo, CO – Carbono Orgânico, K – Potássio, Ca – Cálcio, Mg – Magnésio, H+Al – Hidrogênio + Alumínio, SM – Suscetibilidade Magnética. \*Significativo a 1% de probabilidade pelo Teste t-student; \*\*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste t-student; <sup>NS</sup> Não significativo.

**Tabela 4.** Correlação da suscetibilidade magnética de 0,0-0,20 e 0,60-0,80m e espessura do solo com atributos de maturação de fruto, classificação do café e produção.

| Atributos     | SM 0,0-0,20          | SM 0,60-0,80         | Espessura do solo    |
|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Verde         | 0,195*               | 0,101 <sup>NS</sup>  | -0,094 <sup>NS</sup> |
| Verde Cana    | -0,043 <sup>NS</sup> | -0,045 <sup>NS</sup> | 0,144 <sup>NS</sup>  |
| Cereja        | 0,324*               | 0,283*               | -0,19**              |
| Passa         | 0,046 <sup>NS</sup>  | 0,043 <sup>NS</sup>  | 0,065 <sup>NS</sup>  |
| Seco          | 0,001 <sup>NS</sup>  | -0,03 <sup>NS</sup>  | 0,097 <sup>NS</sup>  |
| Peneira 17    | -0,408*              | -0,357*              | 0,216*               |
| Peneira 16    | 0,247*               | 0,251*               | -0,276*              |
| Peneira 14    | 0,37*                | 0,303*               | -0,177**             |
| Tipo do café  | 0,306*               | 0,284*               | -0,034 <sup>NS</sup> |
| Produtividade | 0,318**              | -0,248**             | 0,285*               |

SM – Suscetibilidade Magnética. \*Significativo a 1% de probabilidade pelo Teste t-student; \*\*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste t-student; <sup>NS</sup> Não significativo.

Foram criados variogramas para os atributos do solo e da planta, SM e espessura do solo a fim de se verificar a dependência espacial desses atributos (Tabela 5). Todos os atributos apresentaram dependência espacial e os modelos esféricos e exponenciais foram os que melhor se ajustaram à estrutura de variabilidade dos dados, fato este que corrobora aqueles obtidos por outros pesquisadores (McBRATNEY; WEBSTER, 1986; CAMBARDELLA et al., 1994).

Observou-se que o alcance dos atributos físicos e de SM do solo na profundidade de 0,0-0,20 m estão próximos, indicando que o padrão de variabilidade da SM é semelhante ao dos atributos do solo. Notou-se também que os valores estimados do alcance dos atributos químicos do solo são similares em ambas as profundidades, indicando alta variabilidade desses elementos e o quanto as práticas de manejo interferem no comportamento do solo. Já os atributos físicos e a SM possuem maiores valores de alcance, indicando menor variabilidade espacial e que esses atributos não sofrem modificações significativas mesmo após anos de exploração agrícola. Resultados semelhantes foram obtidos por Cortez et al. (2011) e Santos et al. (2011) que também encontraram valores semelhantes de alcance de variogramas dos atributos físicos e químicos do solo e da SM.

**Tabela 5.** Análise geoestatística dos atributos de solo e planta.

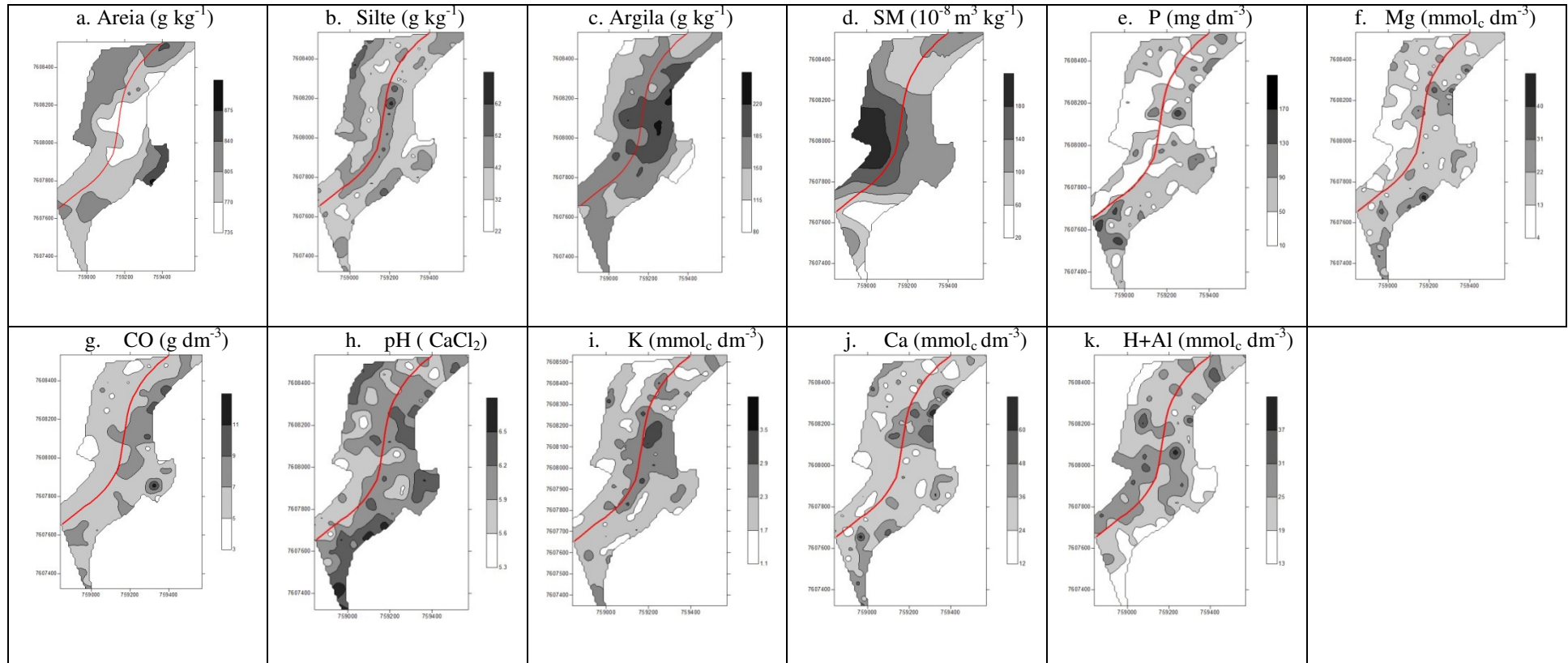
| Atributos            | Profundidade(m) | Modelo      | C <sub>0</sub> | C <sub>0</sub> + C <sub>1</sub> | GDE (%) | Alcance (m) | Validação Cruzada |
|----------------------|-----------------|-------------|----------------|---------------------------------|---------|-------------|-------------------|
| Espessura do solo    | -               | Esférico    | 52,3           | 111,1                           | 47,07   | 41          | 0,282             |
| SM                   | 0,00-0,20       | Gaussiano   | 54             | 1599                            | 3,38    | 150         | 0,918             |
|                      | 0,60-0,80       | Esférico    | 1              | 1594                            | 0,06    | 343         | 0,848             |
| Argila               | 0,00-0,20       | Esférico    | 103            | 943                             | 10,92   | 194         | 0,518             |
|                      | 0,60-0,80       | Exponencial | 156            | 1225                            | 12,73   | 38          | 0,194             |
| Areia                | 0,00-0,20       | Esférico    | 163            | 946                             | 17,23   | 198         | 0,518             |
|                      | 0,60-0,80       | Exponencial | 138            | 1141                            | 12,09   | 34          | 0,15              |
| Silte                | 0,00-0,20       | Exponencial | 9              | 101,3                           | 8,88    | 22          | 0,096             |
|                      | 0,60-0,80       | Esférico    | 20,4           | 264,8                           | 7,70    | 22          | 0,665             |
| pH H <sub>2</sub> O  | 0,00-0,20       | Exponencial | 0,0292         | 0,1574                          | 18,55   | 56          | 0,103             |
|                      | 0,60-0,80       | Exponencial | 0,0042         | 0,0496                          | 8,47    | 16          | 0,06              |
| pH CaCl <sub>2</sub> | 0,00-0,20       | Exponencial | 0,026          | 0,152                           | 17,11   | 54          | 0,103             |
|                      | 0,60-0,80       | Exponencial | 0,0043         | 0,0496                          | 8,67    | 16          | 0,06              |
| P                    | 0,00-0,20       | Esférico    | 0,01           | 0,338                           | 2,96    | 68          | 0,072             |
|                      | 0,60-0,80       | Exponencial | 0,322          | 2,678                           | 12,02   | 23          | 0,019             |
| CO                   | 0,00-0,20       | Exponencial | 0,207          | 2,52343                         | 8,20    | 52          | 0,106             |
|                      | 0,60-0,80       | Gaussiano   | 0,13           | 0,46989                         | 27,67   | 65          | 0,092             |
| K                    | 0,00-0,20       | Exponencial | 0,032          | 0,372                           | 8,60    | 22          | 0,137             |
|                      | 0,60-0,80       | Exponencial | 0,104          | 1,159                           | 8,97    | 26          | 0,104             |
| Ca                   | 0,00-0,20       | Exponencial | 0,0219         | 0,1628                          | 13,45   | 31          | 0,045             |
|                      | 0,60-0,80       | Exponencial | 2,72           | 30,96                           | 8,79    | 19          | 0,07              |
| Mg                   | 0,00-0,20       | Exponencial | 0,0311         | 0,2772                          | 11,22   | 23          | 0,034             |
|                      | 0,60-0,80       | Exponencial | 1,26           | 11,31                           | 11,14   | 22          | 0,031             |
| H+Al                 | 0,00-0,20       | Exponencial | 4,6            | 41,72                           | 11,03   | 43          | 0,175             |
|                      | 0,60-0,80       | Exponencial | 0,97           | 9,74634                         | 9,95    | 20          | 0,086             |
| Produtividade        | -               | Exponencial | 0,100          | 192,90                          | 0,05    | 80,00       | 0,65              |
| Verde                | -               | Esférico    | 10,83          | 23,53                           | 0,544   | 740         | 0,28              |
| Verde Cana           | -               | Esférico    | 14,23          | 40,12                           | 0,645   | 2745        | 0,17              |
| Cereja               | -               | Gaussiano   | 5,58           | 24,59                           | 0,773   | 42,94       | 0,14              |
| Passa                | -               | Gaussiano   | 10,24          | 34,85                           | 0,706   | 885         | 0,27              |
| Seco                 | -               | Esférico    | 18,1           | 61,03                           | 0,703   | 138         | 0,002             |
| Peneira 17           | -               | Esférico    | 48             | 101                             | 0,52    | 959         | 0,061             |
| Peneira 16           | -               | Esférico    | 0,01           | 11,94                           | 0,99    | 72          | 0,07              |
| Peneira 14           | -               | Exponencial | 4,6            | 38,07                           | 0,879   | 180         | 0,21              |
| Classificação        | -               | Exponencial | 76,6           | 506                             | 0,85    | 102         | 0,05              |

C<sub>0</sub>- Efeito Pepita, C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> – Patamar, GDE – Grau de dependência espacial, P – Fósforo, CO – Carbono Orgânico, K – Potássio, Ca – Cálcio, Mg – Magnésio, H+Al – Hidrogênio + Alumínio, SM – Suscetibilidade Magnética.

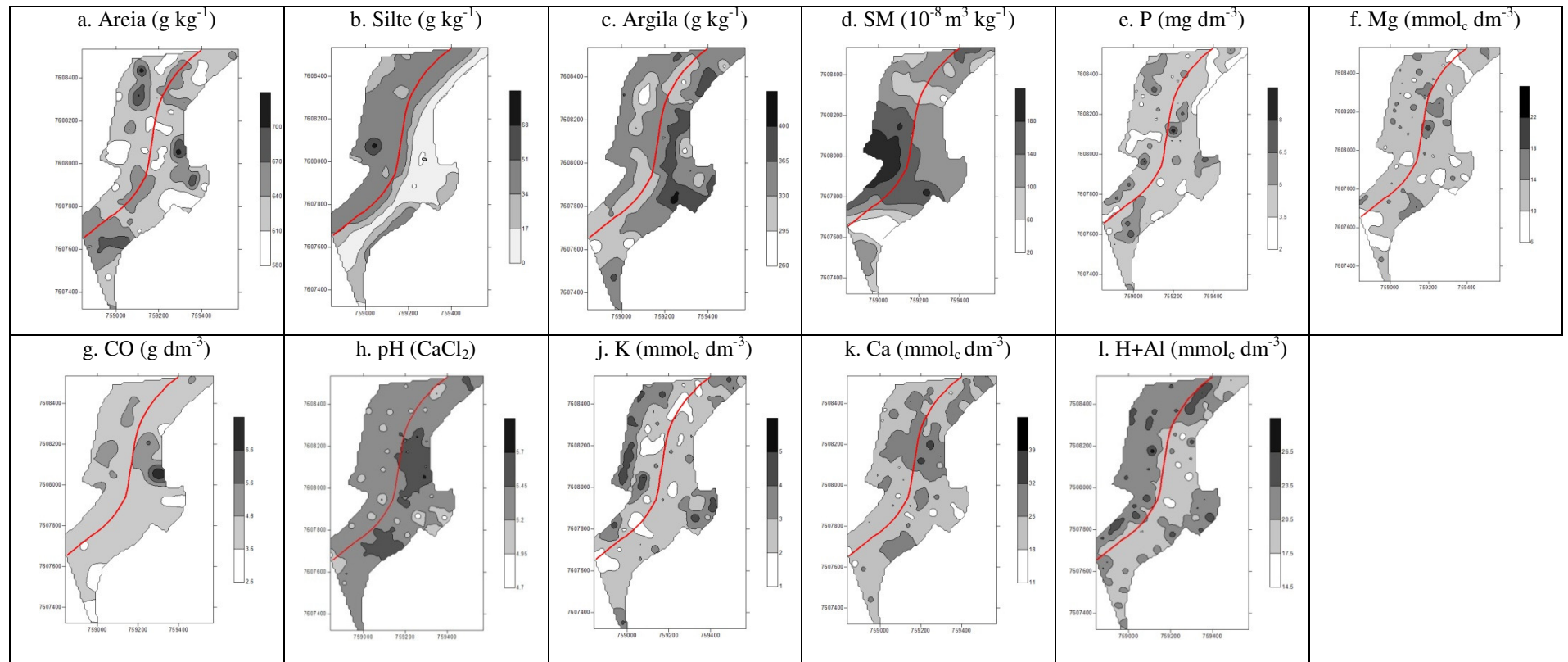
A interpretação do parâmetro alcance do variograma fornece informações que auxiliarão no planejamento amostral levando em conta a variabilidade da área, o que pode balizar estudos futuros em locais semelhantes. Para visualizar a distribuição espacial dos atributos estudados, foram construídos mapas dos atributos do solo e do fruto por meio da geoestatística (Figuras 3,4 e 5).

De acordo com os mapas gerados, foi possível observar que as variações de produtividade do café estão altamente relacionadas às variações de profundidade do solo onde se inicia o horizonte B textural mais argiloso, cujos atributos expressam efeitos positivos na retenção de água (BEUTLER et al., 2002). A boa disponibilidade de água é responsável por permitir a absorção dos nutrientes e a produção de matéria seca pelas plantas (MEDEIROS et al., 2005). Segundo Motta et al. (2006), que estudaram a distribuição horizontal e vertical das raízes do cafeeiro, a maioria das raízes absorventes com menos de 3 mm de diâmetro estão localizadas sob o dossel das plantas e até 0,20 m de profundidade. Assim, mediante os resultados expostos podemos inferir que no ambiente A há melhor absorção de água e nutrientes, aumentando o potencial produtivo da área.

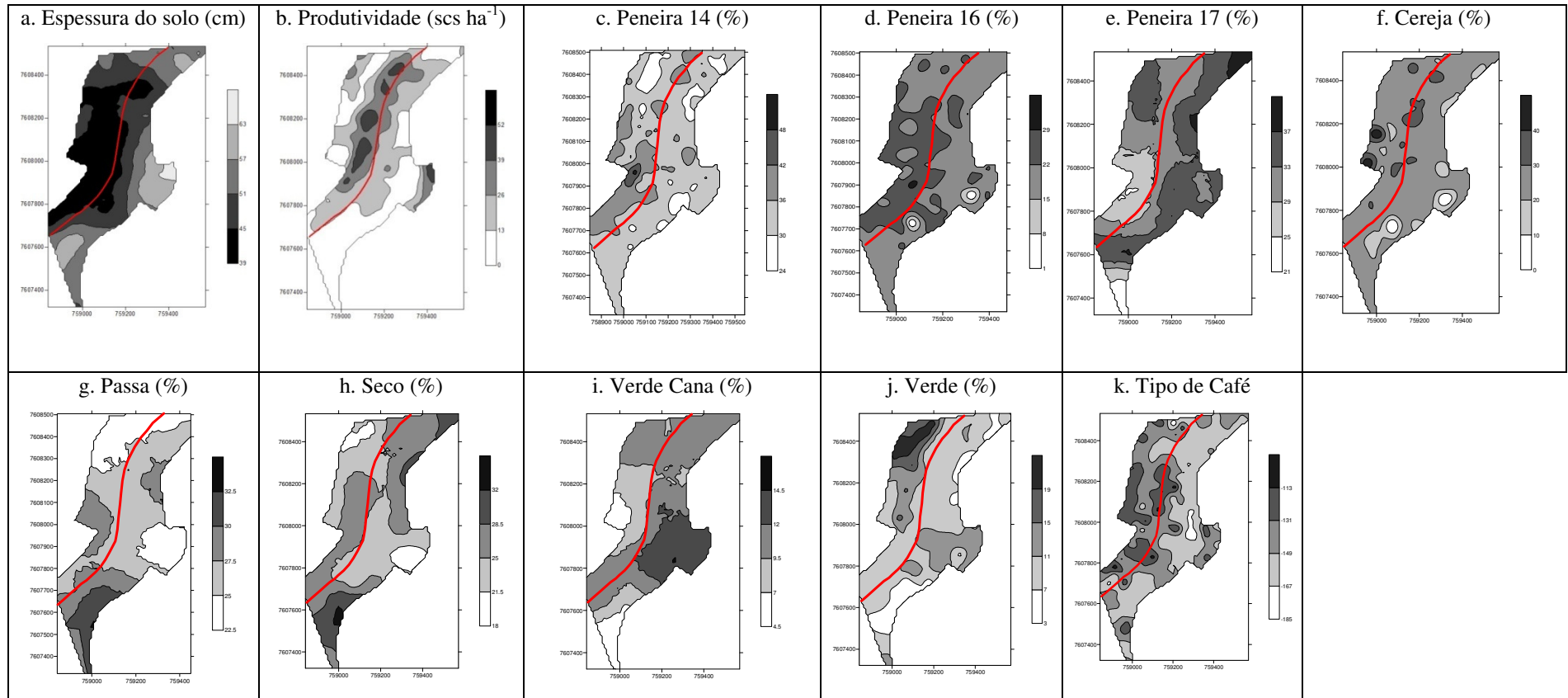
A aplicação das técnicas de mapeamento e diagnóstico de atributos do solo e da planta no campo é altamente viável (Tabela 6). Com base nos resultados obtidos, a aplicação de fertilizantes em taxa variável resultou em uma economia de US\$ 149,00 por hectare em relação ao manejo convencional no ambiente A. Em ambos os ambientes A e B a economia da utilização dessas técnicas foi de aproximadamente US\$ 270,00 por hectare. Resultados semelhantes foram obtidos por Roberts et al. (2010), que constataram economia de US\$ 146 por hectare sob diferentes manejos de adubação com nitrogênio.



**Figura 3.** Mapas dos atributos do solo na profundidade de 0,0 – 0,20 m.



**Figura 4.** Mapas dos atributos do solo na profundidade de 0,60 – 0,80 m.



**Figura 5.** Mapas dos atributos da planta e espessura do solo.

**Tabela 6.** Comparativo de custos e receitas avaliando a separação por ambientes e o manejo convencional de adubação e venda de café.

| Ambientes    | Área  | Produção                  | Custo/ha<br>Adubação*    | Tipo Café**       | Sacas ha <sup>-1</sup> | Lucro em relação<br>à Sacas<br>beneficiadas e |
|--------------|-------|---------------------------|--------------------------|-------------------|------------------------|-----------------------------------------------|
|              | (ha)  | (Sacas ha <sup>-1</sup> ) | (US\$ ha <sup>-1</sup> ) | Exportação<br>(%) | Tipo Café**            | Adubação (US\$)                               |
| A            | 15,62 | 25,69                     | 387                      | 42%               | 11                     | 1221                                          |
| B            | 22,26 | 13,7                      | 389                      | 40%               | 5                      | 430                                           |
| Convencional | 37,88 | 19,7                      | 544                      | 41%               | 8                      | 659                                           |

\* Calcário: US\$34/ton; Cloreto Potássio: US\$646/ton; MAP: \$695/ton. \*\* Tipo 6, bebida dura para melhor saca de café beneficiado (60kg) ~ 350 litros de frutos colhidos; indicador CEPEA/ESALQ - média mensal à vista da bebida tipo 6 para melhor 60 kg: US\$ 148,76 (mês de referência Março de 2013). Tratamento convencional: Calcário: 2 ton ha<sup>-1</sup>; Cloreto de Potássio: 500 Kg ha<sup>-1</sup>; MAP: 120 Kg ha<sup>-1</sup>.

O maior lucro obtido no ambiente A, se deve ao fato de a área ter produzido mais sacas de café com tendência à melhor qualidade dos frutos, quando comparado ao ambiente B. Além disso, a média final do lucro obtido entre os dois ambientes foi maior que o gerado no tratamento convencional, mostrando a eficiência da utilização das técnicas aqui propostas para identificação e manejo específico do solo.

## 2.4. CONCLUSÕES

A espessura do solo e a suscetibilidade magnética demonstraram potencial para auxiliar a identificação de áreas de manejo específico na cultura do café.

A espessura do solo é o atributo de maior influência na absorção de água e nutrientes, assim, o potencial produtivo do café é maior no solo de menor espessura.

A integração de diferentes técnicas de diagnósticos e análises favorece o melhor entendimento das relações pedologia-geomorfologia. Dessa maneira essas ferramentas podem ser utilizadas pelo setor cafeeiro para auxiliar o planejamento sustentável das áreas agrícolas.

A análise da fertilidade do solo e do tipo do café, baseada na separação dos ambientes, demonstrou potencial de ganho econômico quando comparado aos métodos convencionais de manejo.

## 2.5. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira Da Indústria Do Café – **ABIC**. Disponível em <<http://www.abic.com.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=52>>. Acesso em dezembro 2012.

BEUTLER, A. N.; BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I. e ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. vol. 26, 2002.

BURROUGH, P. A.; McDONNEL, R. A. Principles of geographical information systems. **Oxford: University Press**, 2000.

CAMARGO, L.A.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G.T.; HORVAT, R.A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo: II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2279-2288, 2008.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

Companhia Nacional de Abastecimento - **CONAB**. Disponível em <<http://www.slideshare.net/cafeicultura/2-estimativa-da-conab-para-safra-de-cafe-do-brasil-maio2013>>. Acesso em Julho 2013.

CORTEZ, L. A.; MARQUES Jr., J.; PELUCO, R. G.; TEIXEIRA, D. B.; SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na agricultura**, Botucatu, v.26, p.60-79, 2011.

DAY, P. R. Particle fraction and particle-size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.) Methods of soil. **American Society of Agronomy**, Madison, v.1, p. 545-566, 1965.

DEARING, J.A.; HAY, K.L.; BABAN, S.M.K.; HUDDLESTON, A.S.; WELLINGTON, E.M.H.; LOVELAND, P.J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.127, p.728–734, 1996.

DEMATTE, J.A.M.; GALDOS, M.V.; GUIMARÃES, R.; GENÚ, A.M.; NANNI, M.R.; ZULLO Jr, J. Quantification of tropical soil attributes from ETM+/Landsat-7data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.28, p. 3813-3829, 2007.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, p. 212, 1997.

GÂRBACEA G.; IOANE D. Geophysical mapping of soils. **New data on romanian soils based on magnetic susceptibility**. Rev. roum. București v.54, p. 83–95, 2010.

HANESCH, M.; SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, v.161, p. 50-56, 2005.

HUA Y.J.; WANG, R.; XIAO K. Study on distribution of soil magnetic susceptibility and Cu, Zn effective and total contents in Huzhou city, **Changjiang River Delta Nanjing Institute of Geology and Mineral Resources**, Nanjing, 2006.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geostatistics. **New York: Oxford University Press**, p. 561, 1989.

MAHER, B.A.; THOMPSON, R. The magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences, in Quaternary Climates. In: **Environments and Magnetism** (eds Maher, BA e Thompson, R). University Press, Cambridge, p. 81–125, 1999.

MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P. E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v.58, n.3, p. 202-217, 2006.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Littleton, v.58, p. 1246-1266, 1963.

MEDEIROS, R. D.; SOARES, A. A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água: efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência Agrotécnica**. v.29, n. 5, p. 940-947, 2005.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Soil Science Society of America Journal**, Madson, v.37, p. 617-639, 1986.

MOTTA, A. C. V.; NICK, J. A.; YORINORI, G. T.; SERRAT, B. M. Distribuição horizontal e vertical da fertilidade do solo e das raízes de cafeeiro (*Coffea arabica* L.) cultivar Catuaí. **Scientia Agronomica**. v. 28, n. 4, p. 455-463, 2006.

NAVAS A.; GASPARELLO, L. Profiles of <sup>137</sup>Cs and magnetic susceptibility as indicators of soil processes and land uses. **Latinmag Letters**, v.1, D08, 1-6. Special Issue, Argentina, 2011.

RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, J.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, O. C. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas, **Fundação Cargill**, p. 170, 1987.

RAIJ, B. V.; ZULLO, M.A.T. Métodos de análises de solo. Campinas: **Instituto Agrônomo**, 16p. (Circular, 63), 1977.

ROBERTS, D.F.; SHANAHAN J.F.; FERGUSON R.B.; ADAMCHUK V.I.; KITCHEN N.R. A crop and soil strategy for sensor-based variable-rate nitrogen management. In: **Proceedings of the Tenth International Conference on Precision Agriculture**. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2010.

ROYALL, D. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. **Catena**, Amsterdam, v.46, p. 15-34, 2001.

SANCHEZ, M.G.B.; MARQUES Jr., J.; SIQUEIRA, D.S.; CAMARGO, L.A.; PEREIRA, G.T. Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil-relief relationship and numerical classification. **Precision Agriculture**. DOI 10.1007/s11119-012-9288-z, 2012.

SANCHEZ, R.B.; MARQUES Jr, J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.** [online], vol.9, n.4, p. 489-495. ISSN 1415-4366, 2005.

SANCHEZ, R.B.; MARQUES Jr., J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M.; MARTINS FILHO, M.V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, v. 68, p. 873-884, 2009.

SANTOS, H.L.; MARQUES Jr, J.; MATIAS, S.S.R.; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T. Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. **Agrária** (Recife. Online), v. 6, p. 710-716, 2011.

SIQUEIRA, D.S.; MARQUES Jr, J.; MATIAS, S.S.R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L.C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, v.26, p. 425-431, 2010b.

VEROSUB, K.L.; ROBERTS, A.P. Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research**, v.100, p. 2175–2192, 1995.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R. e BIGGAR, J.W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, p.1-75, 1983.

### **CAPÍTULO 3. ÁREAS DE MANEJO ESPECÍFICO DA CULTURA DO CAFÉ UTILIZANDO SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA, ESPESSURA DO SOLO E ATRIBUTOS DA PLANTA**

**RESUMO** – A identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos permite o melhor planejamento das atividades agrícolas. O objetivo do trabalho foi discriminar áreas de manejo específico para a cultura do café utilizando atributos físicos, químicos, a suscetibilidade magnética, espessura do solo e atributos da planta. A área de estudo está localizada no município de Matão, estado de São Paulo e foi ocupada nos últimos 25 anos exclusivamente por café, cuja variedade estudada foi a *Coffea arabica*, cultivar Catuaí Amarelo IAC 62 com 7 anos de idade e espaçamento de plantio 3,5 x 0,50 m. Foi gerada uma malha com intervalos regulares de 45 m em aproximadamente 40 hectares. Foram retiradas amostras de solo nas profundidades de 0,0-0,20 m e 0,60-0,80 m. Também foram avaliados os atributos da planta: teor de macro e micronutrientes da folha, altura da planta, diâmetro da copa e comprimento do ramo plagiotrópico. Os teores nutricionais de folha, SM e espessura de solo apresentaram correlações positivas. Assim, com base nos resultados da geoestatística, pode-se sugerir estes dois atributos como técnicas auxiliares no campo para identificação de locais com diferentes potenciais produtivos.

**Palavras-chave:** *Coffea arabica*, variabilidade espacial, mapeamento de solo, krigagem.

### 3.1. INTRODUÇÃO

A previsão da produtividade permite ao produtor planejar melhor as atividades agrícolas (CARVALHO et al., 2004). No entanto, segundo Weill et al. (1999), um dos problemas na elaboração de modelos de previsão para a safra de café é a variabilidade de fatores ambientais, tais como os atributos de clima e solo. Inúmeras pesquisas já foram feitas com o intuito de identificar os locais ideais para cultura do café com base no clima (EVANGELISTA et al., 2002; ASSAD et al., 2004). Porém, são poucas as pesquisas que deram continuidade aos estudos de causa e efeito entre solo e planta, como os de Weill et al. (1999). Mais raras ainda são as pesquisas voltadas ao estudo da variabilidade espacial desses eventos de causa e efeito.

Com o objetivo de preencher essa lacuna e fornecer mais resultados a comunidade científica e ao setor produtivo, alguns pesquisadores tem utilizado um a classificação numérica no estudo da variabilidade espacial em áreas produtoras de café (SANCHEZ et al., 2005; SILVA et al., 2008). O objetivo destes estudos é identificar áreas com variabilidade controlada dos atributos do solo e da planta. Siqueira et al. (2010a) chamaram estes locais de áreas de manejo específico. A identificação e mapeamento dessas áreas podem auxiliar a elaboração de modelos de previsão da produção de culturas agrícolas.

Recentemente alguns pesquisadores (BARBIERI et al., 2009; LEÃO et al., 2010) têm proposto novas abordagens para caracterizar os solos e seus atributos utilizando simultaneamente métodos determinísticos (similaridade entre pedons, relação solo-relevo, dentre outros) e métodos estocásticos (geoestatística). A união destes métodos gera um novo tipo de mapeamento, chamado híbrido. Segundo McBratney et al. (2002) esse tipo de mapeamento melhora o conhecimento da distribuição dos solos e seus atributos ao longo da paisagem (variabilidade espacial), da precisão e da qualidade da informação, pois diminui a subjetividade apresentada nos métodos tradicionais.

Na avaliação do desempenho dos sistemas agrícolas, a aplicação de indicadores quantitativos, associada com a classificação numérica, é preferível, pois permitem comparações objetivas. Segundo Zhang e Zhang (2005), a análise de medidas pareadas de atributos do solo e da produtividade gera modelos que podem

ser utilizados nas estimativas de desempenho para outras localidades. Bundt et al. (1997) avaliaram o estado nutricional da planta do café para as qualidades das frações de agregado do solo. Para utilizar as informações de uma região específica em outra, é necessário identificar e mapear as áreas com o mesmo padrão de variabilidade das propriedades do solo para garantir a aplicabilidade de modelos de previsão que foram gerados.

Porém, a precisão e exatidão desses procedimentos esta relacionada com o número de pontos de observação, que causam a elevação do custo destes mapeamentos. Outros fatores como o tempo de realização das análises dos atributos do solo e impacto ambiental, provocado pela utilização de reagentes, também são considerados limitantes, tornando-os difíceis de serem realizados rotineiramente. Segundo Demattê et al. (2007), a pouca aplicabilidade da agricultura de precisão na America do Sul é atribuída principalmente aos altos custos das análises de solos. Buscando aumentar o número de pontos coletados, sem que haja elevação dos custos e tempo de análise, alguns pesquisadores têm utilizado a suscetibilidade magnética (SM) (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000; SIQUEIRA et al., 2010b)

A SM é uma característica dos minerais presentes nas rochas e no solo, cuja magnitude depende da concentração e características dos minerais, tais como composição, estrutura espacial do cristal e tamanho (VEROSUB; ROBERTS, 1995).

Vários trabalhos foram desenvolvidos no estudo da quantificação indireta dos atributos do solo. Porém, como o solo é um corpo complexo que apresenta grande variabilidade de seus atributos, é preciso mais informações que elucidem com mais exatidão a aplicabilidade dessas novas técnicas de mapeamento da variabilidade.

Esse tipo de informação é de extrema importância, visto que parte da variabilidade da produção agrícola está associada, dentre outros fatores, com os atributos do solo e da paisagem (SOUSA JÚNIOR et al., 2008). Assim, a caracterização detalhada da variabilidade dos atributos do solo por meio do mapeamento híbrido (utilização conjunta de métodos qualitativos com métodos estocásticos), como o proposto nesse trabalho, pode auxiliar no ajuste dos limites de precisão dos mapas calagem, adubação e outras práticas de manejo para a cultura do café.

O objetivo do trabalho é discriminar áreas de manejo específico para a cultura do café utilizando a suscetibilidade magnética do solo no contexto da relação solo-paisagem.

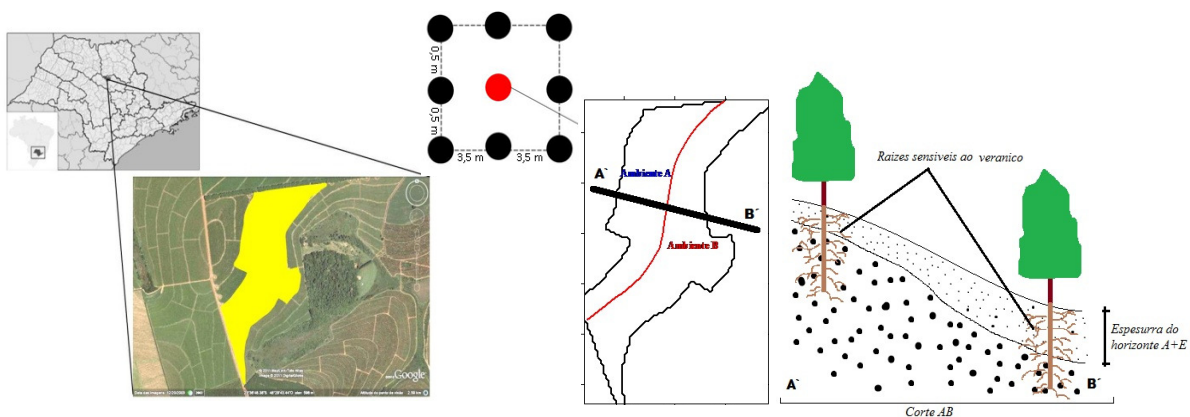
## **3.2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.2.1. Caracterização da área e malha de amostragem**

A área de estudo localiza-se no município de Matão, estado de São Paulo, entre a latitude de 21° 36' S, e longitude de 48° 29' W, altitude variando entre 590 a 615 metros (Figura 1). O clima, de acordo com a classificação de Köppen, é o Aw (tropical), cuja temperatura média do mês mais frio (julho) é de 18°C, e a do mês mais quente (fevereiro) é de 25° C, com temperatura média anual de 22 °C. A pluviosidade média é de 1600 mm por ano. O período de seca ocorre nas estações outono-inverno, e o verão ocorre na primavera-verão (80% do total).

A vegetação predominante é o cerrado e a mata atlântica. A geologia é representada por sedimentos do Grupo Bauru (Formação Adamantina). Segundo os mapas de solos elaborados pela empresa Cambuhy, a área de estudo está caracterizada pelo Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, A moderado, textura média/argilosa.

A área de estudo, de aproximadamente 39 hectares, foi escolhida mediante representatividade fisiográfica regional, onde nos últimos 25 anos foi ocupada exclusivamente por café, cuja espécie estudada foi a *Coffea arabica*, cultivar Catuaí Amarelo IAC 62 com 7 anos de idade e espaçamento de plantio 3,5 x 0,50 m. Desde o plantio a cultura foi conduzida com sistema de fertirrigação por gotejamento e não foram realizadas podas de condução. Para estabelecer os pontos de coleta, foi gerada uma malha amostral sob a área, com intervalos regulares de 45 m, perfazendo um total de 173 pontos (Figura 1). Em cada um dos pontos da malha, a unidade amostral foi composta por nove plantas de café. A coleta de amostras de solo foi realizada sob a copa da planta central da unidade amostral nas profundidades de 0,0-0,20 m e 0,60-0,80 m, onde também foi realizada a avaliação da espessura do solo.



**Figura 1.** Localização da área, malha de amostragem e perfil do terreno.

### 3.2.2. Análise de solo e planta

As amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) foram submetidas a medição da suscetibilidade magnética, utilizando o medidor MS2, da Bartington Instruments Ltd. (SIQUEIRA et al., 2010b). A espessura do solo (horizonte A+E) foi avaliada por meio de tradagens, sendo que para cada ponto da malha foram realizadas três tradagens, das quais foram calculadas as médias.

Foram analisados os seguintes atributos do cafeeiro: (i) macro e micronutrientes da folha, coletadas no mês de abril (ii) altura da planta, (iii) diâmetro da copa, e (iv) comprimento de ramos plagiotrópicos dos dois lados da planta, em que, ramo plagiotrópico de cima (RPC), ou seja ramo do lado da planta com orientação Leste e ramo plagiotrópico de baixo (RPB) com orientação Oeste. Os macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S) e micronutrientes (Zn, Mn, B, Cu, Fe) das folhas foram analisados conforme metodologia de Bataglia (1983).

Os dados de análise de folha foram submetidos à metodologia DRIS. Esta técnica se baseia no cálculo de índices para cada nutriente, avaliados em função da relação das razões dos teores de cada elemento com os demais, comparando-os dois a dois, com as relações padrões, cuja composição mineral é obtida de uma população de plantas de alta produtividade. (BEAUFILS, 1973)

### 3.2.3. Análise estatística dos dados: análise descritiva e geoestatística

Os dados foram submetidos à análise estatística para determinação da média, máximo e mínimo, coeficiente de variação e determinação do coeficiente de correlação Pearson ( $r^2$ ) entre cada par de variáveis estudadas, medindo-se o grau de relação linear entre as variáveis. Esta análise foi realizada no software estatístico Minitab 14 (Minitab, 2000). Foi feita a análise de componentes principais - PCA (do inglês Principal Component Analysis), (JOHNSON e WICHERN, 2002). Para a caracterização da variabilidade espacial, foi utilizada a análise geoestatística (MATHERON, 1963; ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Após o ajuste dos modelos matemáticos permissíveis foi feita à interpolação dos dados por meio da krigagem. A análise geoestatística foi feita no software Surfer versão 8.00.

Com base nos resultados da geoestatística e de algumas pesquisas utilizando a espessura do solo (SANCHEZ et al., 2009) e suscetibilidade magnética (CORTEZ et al., 2011) na identificação de compartimentos com diferentes padrões de variabilidade, a área foi dividida em dois ambientes (Figura 1), que apresentam diferentes profundidades dos horizontes A+E medidos através de gradagem profunda.

Na divisão aparente, a média de profundidade do horizonte A+E no ambiente A é 10 cm menor do que no ambiente B (Figura 1). Com base nessa divisão, as demais avaliações foram comparativas entre os dois ambientes.

## 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teste de Tukey mostrou que a maior parte das médias dos atributos tanto de solo como da planta apresentaram diferença estatística significativa quando separados por ambientes. Isso justifica a utilização das técnicas da suscetibilidade magnética e espessura do solo em estudos da variabilidade do solo (Tabela 1).

Na planta revelou-se uma baixa variabilidade para os atributos N, S, Fe, RPB, Altura de planta e Diâmetro de copa. Os atributos, Ca e B apresentaram variação moderada. Já os atributos com maiores coeficientes de variação na planta foram o RPB, Fe, Mn e Cu.

Comparando-se os teores dos nutrientes no solo e na planta, verificamos que a variação dos nutrientes no solo é maior do que na planta, cujos resultados corroboram aqueles encontrados por Berndtsson e Bahri (1995). Esses pesquisadores relataram que outros fatores, além das variáveis do solo tais como disponibilidade de água, concentração dos solutos, etc., afetam significativamente a variabilidade química na planta, como o tipo de planta e a variabilidade genética.

**Tabela 1.** Estatística descritiva para os atributos de solo, folha e da planta.

| Atributos                                    | Ambientes | Média    | CV    |
|----------------------------------------------|-----------|----------|-------|
| SM ( $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ ) | A         | 174,79 a | 34,23 |
|                                              | B         | 125,91 b | 37,86 |
| Espessura de solo                            | A         | 44,51 b  | 17,4  |
|                                              | B         | 52,6 a   | 19,95 |
| N ( $\text{g kg}^{-1}$ )                     | A         | 29,81a   | 6,37  |
|                                              | B         | 30,60 a  | 4,66  |
| P ( $\text{g kg}^{-1}$ )                     | A         | 1,45 b   | 14,24 |
|                                              | B         | 1,52 a   | 7,51  |
| K ( $\text{g kg}^{-1}$ )                     | A         | 18,45 b  | 13,86 |
|                                              | B         | 20,99 a  | 6,99  |
| Ca ( $\text{g kg}^{-1}$ )                    | A         | 14,92 a  | 24,22 |
|                                              | B         | 10,49 b  | 16,08 |
| Mg ( $\text{g kg}^{-1}$ )                    | A         | 3,04 a   | 12,17 |
|                                              | B         | 2,87 b   | 10,53 |
| S ( $\text{g kg}^{-1}$ )                     | A         | 2,05 a   | 10,66 |
|                                              | B         | 2,04 a   | 9,45  |
| B ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                    | A         | 87,03 a  | 15,61 |
|                                              | B         | 62,76 b  | 14,96 |
| Cu ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                   | A         | 6,58 b   | 18,00 |
|                                              | B         | 12,34 a  | 77,56 |
| Fe ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                   | A         | 86,81 a  | 33,22 |
|                                              | B         | 88,75a   | 39,28 |
| Mn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                   | A         | 241,99 a | 33,41 |
|                                              | B         | 145,87 b | 38,93 |
| Zn ( $\text{mg kg}^{-1}$ )                   | A         | 19,64 a  | 28,69 |
|                                              | B         | 12,55 b  | 18,32 |
| RPB (cm)                                     | A         | 1,000 a  | 32,75 |
|                                              | B         | 0,94 a   | 25,06 |
| RPC (cm)                                     | A         | 0,97 a   | 13,79 |
|                                              | B         | 0,86 b   | 19,10 |
| Altura de Planta (m)                         | A         | 2,47a    | 11,19 |
|                                              | B         | 2,44 a   | 12,08 |
| Diâmetro da copa (m)                         | A         | 1,80 a   | 10,51 |
|                                              | B         | 1,75 a   | 9,00  |

CV – Coeficiente de Variação, N – Nitrogênio, P – Fósforo, K – Potássio, Ca – Cálcio, Mg – Magnésio, S – Enxofre, B – Boro, Cu – Cobre, Fe – Ferro, Mn – Manganês, Zn – Zinco, SM – Suscetibilidade Magnética, RPB – Ramo Plagiotrópico de Baixo (orientação Oeste), RPC – Ramo Plagiotrópico de Cima (orientação Leste). Valores seguidos pela mesma letra na coluna não se diferem estatisticamente, pelo teste de Tukey, a 5 % de probabilidade.

A suscetibilidade magnética apresentou um dos maiores CV entre os atributos do solo. Isto reflete a grande sensibilidade deste atributo aos processos do solo que

variam continuamente na paisagem. Segundo Mathé et al. (2006), a SM pode ser utilizada para avaliar minerais do solo funcionando como um micro indicador das condições do solo. Com isso, pode-se justificar a divisão da área em áreas de manejo específico em função de fatores como a espessura do solo, citada por Sanchez et al., (2009).

O alto coeficiente de variação para a maioria dos valores dos atributos indica alta variabilidade nos dados, justificando a utilização das técnicas de geoestatística para melhor compreensão da relação de causa-efeito entre a variabilidade dos atributos do solo e da planta.

Os atributos da planta foram correlacionados com os valores de SM e espessura de solo (Tabela 2). Os elementos Ca, B, Mn e Zn correlacionam positivamente com a SM indicando que quanto maior o seu valor maior o teor desses atributos na planta. Já os valores de P, K e Cu, correlacionaram positivamente com a espessura do solo. Isso significa que quanto maior a espessura do solo, maior a quantidade desses atributos. Hanesch e Scholger (2005) também relataram correlações significativas entre a SM e atributos do solo tais como teor de argila, matéria orgânica, pH, Cu, Co, Ni e Zn em diferentes classes de solos. Assim como Marques Jr. et al. (2009) que também encontrou correlação significativa entre a SM e atributos qualitativos da cana de açúcar.

Deste modo, esses resultados indicam que a SM do solo é um método indireto de avaliação dos atributos do solo, concordando com Hartemink (2007) que afirmou que os estudos em ciência do solo caminham para quantificação indireta de atributos do solo.

Os atributos RPB, altura de planta, diâmetro de copa, N, P, K e Cu correlacionam negativamente com a SM, indicando que, quanto maior for a SM, menor será o valor desses atributos na planta. A correlação dos atributos da planta com a espessura de solo não foi significativa para RPB, altura de planta, diâmetro de copa, N, Mg, S, Fe e Mn. Os atributos RPC, Ca, B e Zn correlacionaram-se negativamente com a espessura do solo, portanto quanto maior a espessura do solo, menor o valor desses atributos.

**Tabela 2.** Correlação da SM e Espessura do solo com os atributos de planta.

| Atributos        | SM                   | Espessura do Solo    |
|------------------|----------------------|----------------------|
| N                | -0,128 <sup>NS</sup> | 0.034 <sup>NS</sup>  |
| P                | -0,177 <sup>*</sup>  | 0.268 <sup>**</sup>  |
| K                | -0,265 <sup>**</sup> | 0.236 <sup>**</sup>  |
| Ca               | 0,405 <sup>**</sup>  | -0.338 <sup>**</sup> |
| Mg               | 0,141 <sup>NS</sup>  | -0.062 <sup>NS</sup> |
| S                | 0,143 <sup>NS</sup>  | -0.067 <sup>NS</sup> |
| B                | 0,396 <sup>**</sup>  | -0.366 <sup>**</sup> |
| Cu               | -0,245 <sup>**</sup> | 0.257 <sup>**</sup>  |
| Fe               | 0,006 <sup>NS</sup>  | -0.045 <sup>NS</sup> |
| Mn               | 0,325 <sup>**</sup>  | -0.027 <sup>NS</sup> |
| Zn               | 0,395 <sup>**</sup>  | -0.283 <sup>**</sup> |
| RPB              | -0.151 <sup>*</sup>  | -0.131 <sup>NS</sup> |
| RPC              | 0.102 <sup>NS</sup>  | -0.32 <sup>**</sup>  |
| Altura de planta | -0,073 <sup>NS</sup> | -0.029 <sup>NS</sup> |
| Diâmetro da copa | -0,033 <sup>NS</sup> | -0.059 <sup>NS</sup> |

N – Nitrogênio, P – Fósforo, K – Potássio, Ca – Cálcio, Mg – Magnésio, S – Enxofre, B – Boro, Cu – Cobre, Fe – Ferro, Mn – Manganês, Zn – Zinco, SM – Suscetibilidade Magnética, RPB – Ramo Plagiotrópico de Baixo (orientação Oeste), RPC – Ramo Plagiotrópico de Cima (orientação Leste).

\*Significativo a 5% de probabilidade pelo Teste t-Student; \*\*Significativo a 1% de probabilidade pelo Teste t-Student; <sup>NS</sup> - Não significativo.

Os parâmetros dos variogramas indicam que todos os atributos estudados apresentam dependência espacial. Os modelos exponenciais e esféricos foram os que melhor se ajustaram à estrutura da variabilidade espacial dos dados, concordando com McBratney e Webster (1986) que estudaram modelos de ajuste do variograma para os atributos do solo, os quais relataram que os modelos esféricos e exponenciais são os mais encontrados. Outros pesquisadores (CAMBARDELLA et al., 1994) relataram que o modelo matemático esférico é o mais adaptado para descrever o comportamento de atributos das plantas e dos solos.

O efeito pepita é um parâmetro importante do semivariograma e indica variabilidade não explicada, considerando a distância de amostragem utilizada (McBRATNEY; WEBSTER, 1986). Segundo a classificação proposta por Cambardella et al. (1994), a dependência espacial é considerada forte quando os variogramas têm um efeito pepita  $\leq 25$  % do patamar, moderada quando o efeito encontra-se entre 25 e 75%, e fraca  $>75\%$ .

Quanto aos atributos da planta RPB, diâmetro de copa, N, P, K, Ca, Mg, S, B, Mn, Zn foi encontrado grau de dependência espacial forte, e nos demais atributos RPC, altura de planta, Cu e Fe foi encontrado grau de dependência espacial moderada. Verificou-se um grau de dependência espacial forte para o atributo SM e moderado para espessura do solo. Os valores do alcance relativos aos variogramas

têm uma importância considerável na determinação do limite da dependência espacial, podendo ser também um indicativo do intervalo entre unidades de mapeamento de solos (TRANGAMAR et al. 1985; SOUZA et al., 1997; GREGO; VIEIRA, 2005). Os atributos estudados apresentaram diferentes alcances de dependência espacial.

**Tabela 3.** Análise geoestatística dos atributos estudados.

| Atributos         | Modelos     | C <sub>0</sub> | C <sub>0</sub> +C <sub>1</sub> | GDE%  | Alcance(m) | R <sup>2</sup> |
|-------------------|-------------|----------------|--------------------------------|-------|------------|----------------|
| Solo              |             |                |                                |       |            |                |
| Espessura do solo | Esférico    | 52,30          | 111,10                         | 47,07 | 41,00      | 0,80           |
| SM                | Gaussiano   | 54,00          | 1599,00                        | 3,38  | 150,00     | 0,92           |
| Planta            |             |                |                                |       |            |                |
| N                 | Exponencial | 0,309          | 1,92                           | 16,09 | 104,00     | 0,41           |
| P                 | Esférico    | 0,001          | 0,02                           | 3,88  | 99,00      | 0,62           |
| K                 | Esférico    | 0,010          | 4,54                           | 0,22  | 117,00     | 0,57           |
| Ca                | Gaussiano   | 0,010          | 11,48                          | 0,09  | 68,00      | 0,59           |
| Mg                | Esférico    | 0,005          | 0,12                           | 4,04  | 77,00      | 0,80           |
| S                 | Gaussiano   | 0,006          | 0,04                           | 15,90 | 45,00      | 0,77           |
| B                 | Gaussiano   | 19,100         | 274,90                         | 6,95  | 93,00      | 0,83           |
| Cu                | Esférico    | 7,600          | 25,86                          | 29,39 | 245,00     | 0,58           |
| Fe                | Exponencial | 9,640          | 19,29                          | 49,97 | 156,00     | 0,63           |
| Mn                | Exponencial | 2,510          | 19,58                          | 12,82 | 25,00      | 0,41           |
| Zn                | Esférico    | 3,530          | 23,34                          | 15,12 | 196,00     | 0,58           |
| RPB               | Exponencial | 0,002          | 0,02                           | 10,07 | 42,00      | 0,15           |
| RPC               | Esférico    | 0,011          | 0,03                           | 43,10 | 493,00     | 0,78           |
| Altura            | Exponencial | 0,203          | 0,41                           | 49,63 | 176,00     | 0,80           |
| Diâmetro          | Exponencial | 0,002          | 0,02                           | 10,24 | 39,00      | 0,39           |

C<sub>0</sub>- Efeito Pepita, C<sub>0</sub> + C<sub>1</sub> – Patamar, GDE – Grau de dependência, N – Nitrogênio, P – Fósforo, K – Potássio, Ca – Cálcio, Mg – Magnésio, S – Enxofre, B – Boro, Cu – Cobre, Fe – Ferro, Mn – Manganês, Zn – Zinco, SM – Suscetibilidade Magnética, RPB – Ramo Plagiotrópico de Baixo (orientação Oeste), RPC – Ramo Plagiotrópico de Cima (orientação Leste).

Mapas foram construídos para representar a distribuição espacial dos atributos do solo estudados (Figura 2). Notou-se que os atributos SM e a espessura do solo apresentaram variabilidade semelhante, confirmando os coeficientes de correlação da Tabela 2.

Os teores foliares de N, P, K, Fe, Mn e Cu apresentaram menores valores no ambiente A, coincidindo com os maiores valores de SM e menor espessura do solo. Nas áreas que resultam em maior produtividade, os nutrientes N, P e K se encontram em menores concentrações na planta, evidenciando uma maior

exportação desses nutrientes para o fruto. Isso se deve em parte à relação de causa e efeito entre a espessura do solo e a disposição das raízes (Figura 1). A forma da paisagem no ambiente A condiciona menor espessura do solo (SANCHEZ et al., 2012), proporcionando um ambiente favorável às raízes novas, responsáveis pela maior parte da absorção dos nutrientes citados anteriormente.

Para comparar o balanceamento nutricional foliar dos dois ambientes, foi realizada avaliação segundo critérios DRIS (Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação) e em cada ponto de amostragem foi gerado um índice de balanço nutricional (IBN). Segundo os critérios de avaliação, quanto mais próximo de 1, melhor está a condição nutricional da planta. Na Figura 2r, o IBN no ambiente A está longe do balanceamento, enquanto no ambiente B, o índice está mais próximo do ideal.

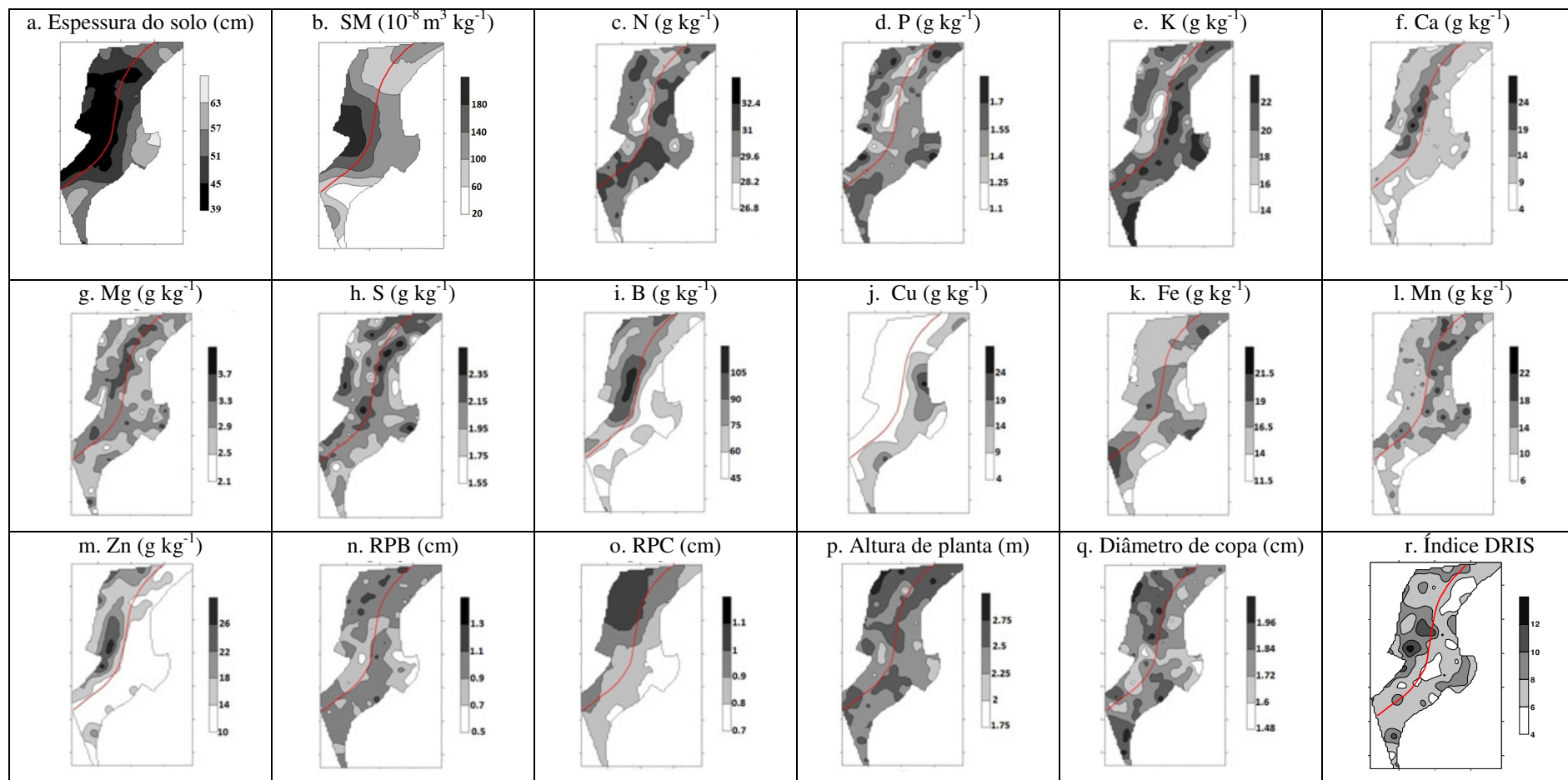
As amostras de folhas do ambiente A estão mais desequilibradas, pois grande parte dos nutrientes foi exportada para o desenvolvimento do grão. O ambiente B por sua vez, não demandou grande quantidade de nutrientes, assim permanecendo no tecido foliar.

Os teores nutricionais foliares de Ca, B, Cu e Mn apresentaram diferença significativa quando separados por ambiente (Figura 3). É possível, portanto, através da identificação e separação das áreas de manejo, realizar recomendações específicas para cada ambiente utilizando os valores obtidos de SM.

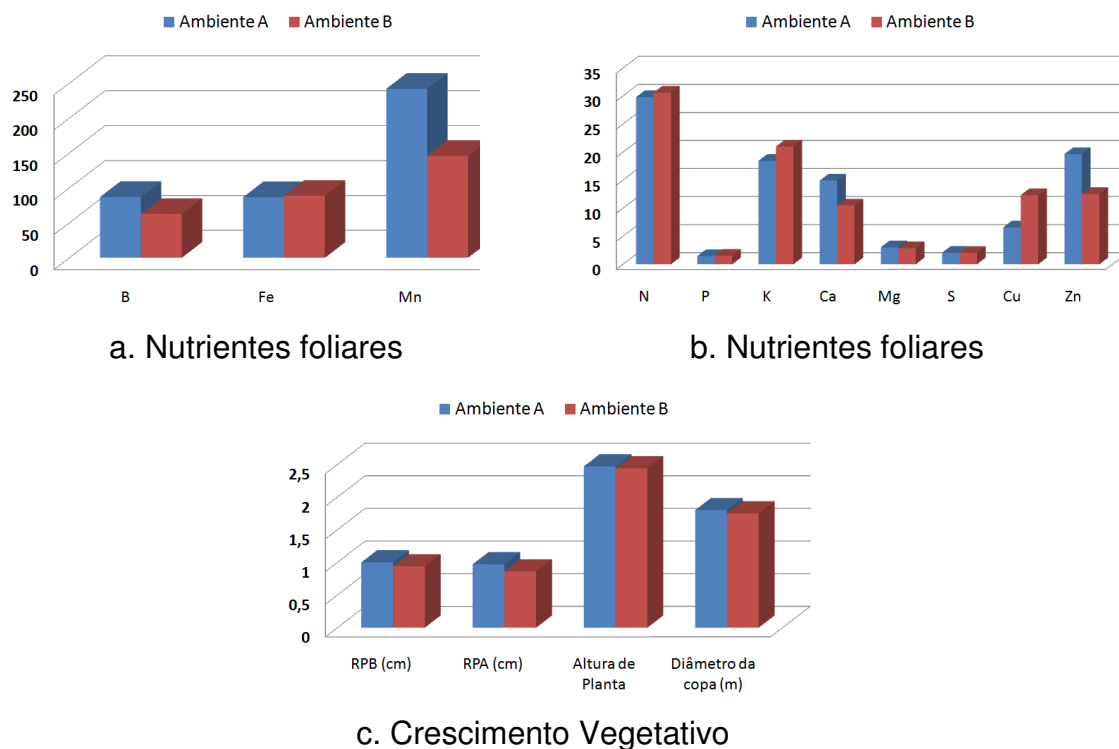
Salienta-se ainda que os nutrientes não sofreram ação de diluição pelo maior crescimento da parte vegetativa, visto que esses atributos não apresentaram diferenças estatísticas entre os ambientes (Figura 3c).

Essa visão espacial permite um melhor planejamento das práticas agrícolas como adubação, calagem, irrigação e inclusive colheita. Garantindo ao produtor melhor aproveitamento do investimento com os tratos culturais e agregando maior valor ao seu produto.

Siqueira et al. (2010) e Cortez et al. (2011) mostraram que a identificação de áreas de manejo específico é uma alternativa para auxiliar nas praticas de manejo agrícola, promovendo maiores ganhos de maneira sustentável.



**Figura 2.** Mapas de distribuição espacial dos atributos do solo, planta e folha



**Figura 3.** Gráficos dos teores nutricionais foliares e crescimento vegetativo

Apesar dos teores nutricionais de folha estarem dentro dos padrões considerados aceitáveis em ambos os ambientes, pequenas variações nas interações entre solo-planta, são capazes de beneficiar ou prejudicar a absorção de um elemento em detrimento de outro e são essas mesmas interações que podem definir o sucesso da cultura do café.

### 3.4. CONCLUSÕES

A suscetibilidade magnética e a espessura do solo demonstraram-se capazes de identificar locais com diferentes aptidões para a produção do café.

Os teores de nutrientes no solo nem sempre são compatíveis com os teores nas folhas e a suscetibilidade magnética e a espessura do solo são capazes de dar indicativos de como a interação solo-planta irá ocorrer.

A integração de diferentes técnicas de análise como a geoestatística e relação solo-relevo, favorece o melhor entendimento das relações pedologia-geomorfologia. Dessa maneira, estas ferramentas podem ser utilizadas pelo setor cafeeiro para auxiliar no planejamento sustentável das áreas agrícolas.

### 3.5. REFERÊNCIAS

ASSAD, E.D.; PINTO, H.S.; ZULLO JUNIOR, J.; ÁVILA, A.M.H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.39, p. 1057-1064, 2004.

BARBIERI, D.M.; MARQUES JR J. ALLEONI, L.R.F.; GARBUIO, F.J.; CAMARGO, L.A. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, v.66, p. 819-826, 2009.

BATAGLIA, O.C.; FURLANI, A.M.C.; TEIXEIRA, J.P.F.; FURLANI, P.R.; GALLO, J.R. Métodos de análise química das plantas. **Boletim do Instituto Agrônomo de Campinas**, Campinas, n.º 78, 1983, 48p.

BERNDTSSON, R.; BAHRI, A. Field variability of element concentrations in wheat and soil. **Soil Science**, Madison, v.159, n.5, p.311-320, 1995.

BEAUFILS, E. R. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). A general scheme of experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition. **Soil Science Bulletin**, University of Natal, Pietermaritzburg. South Africa. p.132, 1973.

BUNDT, M.; KRETZSCHMAR, S.; ZECH, W.; WILCKE, W. Seasonal dynamics of nutrients in leaves and xylem sap of coffee plants as related to different soil compartments. *Plant and Soil*, v.197, p. 157–166, 1997.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CARVALHO, L. G.; SEDIYAMA, G. C.; CECON, P.R.; ALVES, H.M.R. Modelo de regressão para a previsão de produtividade de cafeeiros no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, p. 204-211, 2004.

CORTEZ, L. A. ; MARQUES JR., J. ; PELUCO, R. G. ; TEIXEIRA, D. B. ; SIQUEIRA, D. S. . Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na agricultura** (UNESP. Botucatu. CD-Rom), v. 26, p. 60-79, 2011.

DEMATTE, J.A.M.; GALDOS, M.V.; GUIMARÃES, R.; Genú, A.M.; Nanni, M.R.; Zullo Jr, J. Quantification of tropical soil attributes from ETM+/Landsat-7data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v.28, p. 3813 – 3829, 2007.

EVANGELISTA, A.W.P.; CARVALHO, L.G.; SEDIYAMA, G.C. Zoneamento climático associado ao potencial produtivo da cultura do café no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina grande, v.6, p. 445-452, 2002.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.169-177, 2005.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.64, n. 6, p. 2174-2180, 2000.

HANESCH, M., SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, v.161, p. 50-56, 2005.

HARTEMINK, A. E. El futuro Del La ciência Del suelo, p. 165, 2007.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. An introduction to applied geostatistics. **New York: Oxford University Press**, p. 561, 1989.

JOHNSON, R.A.; WICHERN, D.W. Applied multivariate analysis 5th ed. Prentice Hall, **Upper Saddle River**, NJ, 2002.

LEÃO, M.G.A.; MARQUES Jr, J.; SOUZA, Z.M.; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T. O relevo na interpretação da variabilidade espacial dos teores de nutrientes em folha de citros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p. 1152-1159, 2010.

MAHER, B.A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications, **Palaeogeog.** alaeoclimat. Palaeoecol, v.137, p.25-54, 1998.

MARQUES Jr, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P. E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v.58, n.3, p. 202-217, 2006.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Littleton, v.58, n. 8, p. 1246-1266, 1963.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.37, p. 617-639, 1986.

McBRATNEY, A.; MYNASTY, B.; STEPHEN R. CATTLE, R. WILLEM VERVOORT. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam. v. 109, p. 41-73. 2002.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils and clay by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, New York, v.7, p. 317-327, 1960.

MINITAB. Release,. Making Data Analysis Easier: Version 13.1.models. **Comptes Rendus Geoscience**, v.335, p. 1121–1130, 2000.

SANCHEZ, R.B.; MARQUES Jr, J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. Variabilidade espacial de propriedades de Latossolo e da produção de café em diferentes superfícies geomórficas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.9, p. 489-495, 2005.

SANCHEZ, R.B.; MARQUES, Jr, J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M.; MARTINS, FILHO, M.V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, v.68, p. 873-884, 2009.

SANCHEZ, M.G.B.; MARQUES Jr., J.; SIQUEIRA, D.S.; CAMARGO, L.A.; PEREIRA, G.T. Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil–relief relationship and numerical classification. **Precision Agriculture**. DOI 10.1007/s11119-012-9288-z, 2012.

SILVA, F.M.; MENEZES, Z.; PEREIRA, C.A.; VIEIRA, L.H.; OLIVEIRA, E. Spatial variability of chemical attributes and coffee productivity in two harvests. **Ciência Agrotecnica**, v.32, p. 231-241, 2008.

SIQUEIRA, D.S., MARQUES Jr., J., PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, v.155, p. 55-66, 2010.

SIQUEIRA, D.S.; MARQUES Jr, J.; PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, v.155, p. 55-66, 2010a.

SIQUEIRA, D.S.; MARQUES Jr, J.; MATIAS, S.S.R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L.C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, v.26, p. 425-431, 2010b.

SOUZA JUNIOR, J.G.; DEMATTÊ, J.A.M.; GENÚ, A.M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.727-738, 2008.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.3, p. 367-372, 1997.

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p. 45-93, 1985.

VEROSUB, K.L.; ROBERTS, A.P.; Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research**, v.100, p. 2175–2192, 1995.

WEILL, M.A.M.; ARRUDA, F.B.; OLIVEIRA, J.B.; DONZELI, P.L.; VAN RAIJ, B. Avaliação de fatores edafoclimáticos e do manejo na produção de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) no oeste Paulista. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p. 891-901, 1999.

ZHANG, H.; ZHANG, G.L. Landscape-scale soil quality change under different farming systems of a tropical farm in Hainan, China. **Soil Use and Management**, v.21, p. 58-64, 2005.